

---

# **Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- Tau-Wechseleinflusses auf Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden**

Vom Fachbereich Material- und Geowissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades  
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing. Hauke Anbergen  
aus Hamburg

Referent: Prof. Dr. Ingo Sass  
Korreferent: Prof. Dr. Lutz Müller

Tag der Einreichung: 31.08.2014  
Tag der mündlichen Prüfung: 12.12.2014

Darmstadt 2015

D 17



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

---

---

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf  
Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden

Hauke Anbergen

August, 2014

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Angewandte Geowissenschaften  
Fachgebiet Angewandte Geothermie  
Schnittspahnstraße 9  
D-64287 Darmstadt  
[www.iag.tu-darmstadt.de](http://www.iag.tu-darmstadt.de)

Referent: Prof. Dr. Ingo Sass  
Technische Universität Darmstadt  
Institut für Angewandte Geowissenschaften  
Fachgebiet Angewandte Geothermie

Korreferent: Prof. Dr. Lutz Müller  
Hochschule Ostwestfalen-Lippe  
Fachbereich Umweltingenieurwesen und Angewandte Informatik  
Fachgebiet Geotechnik und Geothermie

---

Hauke Anbergen, Hamburg, den 31. August 2014

---

## KURZFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Untersuchung des Einflusses von zyklischen Frost-Tau-Belastungen auf die hydraulische Integrität von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden vorgestellt.

Erdwärmesonden sind die häufigste Ausführungsform der oberflächennahen Geothermie in Deutschland und werden meist in Kombination mit Wärmepumpen für die Temperierung von Gebäuden genutzt. Ein bautechnisch kritischer Lastfall ist die Belastung der Hinterfüllung durch Frost-Tau-Wechsel aufgrund von zeitweise hohem Wärmeentzug. Der hohe Wärmeentzug kann dabei planmäßig, aber unter Umständen auch unplanmäßig stattfinden. Dieses kann die hydraulische Integrität von Erdwärmesonden negativ beeinflussen. Die meisten Leitfäden der Bundesländer fordern daher den Einsatz von Hinterfüllmaterialien, die gegen zyklische Frost-Tau-Belastungen widerstandsfähig sind. Jedoch existiert bis dato kein genormtes Prüfverfahren für eine Eignungsprüfung.

Bei der bisherigen Anwendung genormter Frost-Prüfverfahren aus dem Betonbau oder für Natursteinprüfungen werden die theoretischen Hintergründe des Durchfrostungsprozesses und der bodenmechanischen Randbedingungen der Hinterfüllung von Erdwärmesonden ungenügend berücksichtigt. Dies gab Anlass die Frost-Tau-Wechsel bei Erdwärmesonden wissenschaftlich zu untersuchen und über ein Prüfverfahren, welches den maßgeblichen Randbedingungen der Einbausituation von Hinterfüllungen entspricht, das Materialverhalten zu charakterisieren. Es werden die theoretischen Hintergründe der Belastung durch Eisbildung in Erdwärmesonden sowie die Umsetzung in ein geeignetes Prüfverfahren dargestellt.

In Voruntersuchungen wurde die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften von Hinterfüllmaterialien untersucht und Randbedingungen für die Hauptuntersuchungen definiert. In Kombination mit den Erkenntnissen vorheriger Untersuchungen an Hinterfüllmaterialien konnten so vier Prüfkriterien aufgestellt werden. Diese besagen, dass

- 1) die Durchlässigkeit des Systems Sonde / Hinterfüllung ausschlaggebend ist.
- 2) die Systemdurchlässigkeit auch nach der Simulation der zyklischen Frost-Tau-Belastungen ermittelt werden muss.

- 3) während des gesamten Prüfablaufs die Prüfkörper in der Messapparatur unter definierten Spannungszuständen verbleiben müssen.
- 4) die Durchfrostung der Prüfkörper wie *in-situ* von innen nach außen erfolgen muss.

Die Prüfkriterien wurden in einer modifizierten Wasserdurchlässigkeitsmesszelle umgesetzt. Die Prüfkörper für die Messzelle sind maßstabsgetreu zu realen Erdwärmesondenabmessungen konzipiert und verfügen über ein mittiges Sondenrohr für die Temperierung von innen nach außen. Das Prüfverfahren misst direkt die hydraulische Leitfähigkeit eines Modellsystems einer Erdwärmesonde unter Berücksichtigung der Materialdurchlässigkeit in Kombination mit den präferierten Wasserwegigkeiten entlang des Sondenrohres. Die Prüfkörper verbleiben während der gesamten Prüfung unter definierten Spannungsrandbedingungen in der Messapparatur und werden wie *in-situ* von innen nach außen durchfrostet. Darüber kann die frost-tau-bedingte Änderung der Systemdurchlässigkeit quantifiziert werden.

Das Prüfverfahren wurde an einer Auswahl von Hinterfüllbaustoffen getestet und die Funktion an unterschiedlichen Anlagenperipherien und in verschiedenen Laboratorien überprüft. Somit konnte belegt werden, dass die Standortunabhängigkeit gegeben ist. Die Versuche an den Einzelkomponenten von Hinterfüllbaustoffen zeigten, dass das Prüfverfahren für jegliche Hinterfüllmaterialien für Erdwärmesonden geeignet ist. Über Versuche mit großen Anzahlen an Frost-Tau-Wechsel konnten Aussagen zur allgemeinen Charakteristik des Frost-Tau-Wechsel-Einflusses getroffen werden. Die durchgeführten Tracerversuche bestätigen die Notwendigkeit der Forderungen nach Messungen der Systemdurchlässigkeit.

Die Temperatursausbreitung in der Messzelle während der Versuchsdurchführung wurde experimentell überwacht und anhand numerischer thermisch-hydraulisch gekoppelter Berechnungen validiert. Im Rahmen der numerischen Validierung wurde ein Plug-In für die Finite Element Methode Software FEFLOW entwickelt, welches die Berechnung von Phasenwechselvorgängen ermöglicht. Das Plug-In wurde an numerischen und analytischen Lösungen kalibriert und kann für die Berechnung von Frost-Tau-Wechsel-Ereignissen in Erdwärmesonden verwendet werden. Dabei werden die Veränderungen der hydraulischen und thermischen Materialparameter berücksichtigt, ebenso wie die Einflüsse der Kristallisationswärme während der Übergänge zwischen den flüssigen und festen Phasen. Mit dem Plug-In können Durchfrostungssimulationen mit FEFLOW modelliert werden.

Es wird gezeigt, dass die hydraulische Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden um zwei Zehnerpotenzen höher ist als die reine Materialdurchlässigkeit. Der Frost-Tau-Wechseleinfluss auf die Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden ist materialspezifisch. Die ersten Frost-Tau-Wechsel-Belastungen sind entscheidend für die Systemdurchlässigkeit, spätere Durchfrostungen haben keinen Einfluss mehr. Aufgrund der geringen Abmessungen der entwickelten Messzellen, einer Handhabung, die derer üblicher bodenmechanischer Versuche ähnelt und der Einbettung in die gängigen Prüfverfahren der Bodenmechanik, kann das Prüfverfahren nahezu in jedes Erdbaulabor implementiert werden. Dadurch kann das Prüfverfahren zu einer flächendeckenden Qualitätssicherung in der oberflächennahen Geothermie beitragen.





## ABSTRACT

In this dissertation a testing procedure for the assessment of the influence of cyclic freeze-thaw-stresses on borehole heat exchanger grouts is developed, calibrated and validated.

In Germany the borehole heat exchanger is the most common application for shallow geothermal systems. It is used for domestic heating coupled with a ground source heat pump system. During periods of extensive heat extraction freezing and thawing of the grout of the borehole heat exchanger might occur. This can affect the sealing properties of the grout. Consequently legal authorities require that grouting materials have to be resistant against freeze-thaw-cycles. However, there is no standardized procedure to test freeze-thaw-resistance of geothermal grouts.

Due to broad experiences in cyclic freeze-thaw-tests for concrete and natural stones, most previous grout tests relied on testing procedures for these materials. The procedures focus on the assessment of mechanical properties such as compressive strength or the loss of weight caused by frost. However, these tests do not follow the in-situ boundary conditions for geothermal grouts and also neglect to take into account the theoretical models of freezing-processes. To address these shortcomings a testing procedure was developed that simulates the downhole in-situ conditions as confining radial earth-pressure, freezing and thawing direction from the inside to the outside, and saturated conditions. The hydraulic conductivity can be measured in axial flow direction. Thus statements according to the susceptibility of grouts against cyclic freezing and thawing stresses can be made. The theoretical models and the implementation of the testing procedure will be discussed.

Time- and temperature dependency of grouting materials was investigated and thus four criteria for a valid testing procedure were formulated:

- 1) The hydraulic conductivity of the system grout / probe has to be assessed.
- 2) The systems' hydraulic conductivity has to be assessed after a freely selectable number of freeze-thaw-cycles.
- 3) The specimen must remain under defined pressure conditions inside the testing device during the whole procedure.
- 4) The specimens must be frozen radially from inside out, simulating in-situ conditions.

The specimens were designed in true portions to a real borehole heat exchanger. They are composed of an axial polyethylene pipe and a surrounding grout body. Thus the systems' hydraulic conductivity is considered.

Several grouts were tested and the procedure was implemented in different geotechnical laboratories with different infrastructures. Therewith procedural independency with regard to laboratories or locations was proven. Tests with pure components of grouts were executed in order to proof the variability of the procedure. A testing series with a high number of freeze-thaw-simulations showed the general hydraulic behavior of frost-stressed grouts. Tracer tests underpinned the need of the assessment of the system hydraulic conductivity.

Temperature during the freeze-thaw-simulations was logged and validated experimentally and numerically. Therefore a plug-in was developed for the finite element method software FEFLOW. The plug-in enables FEFLOW to simulate phase change processes considering the temperature dependent material properties while including latent heat effects.

Based on tests conducted the following conclusion can be made:

The system hydraulic conductivity is higher than hydraulic conductivity of the bulk material;

the difference is of a magnitude around two;

the increase of the system hydraulic conductivity due to cyclic freeze-thaw-stresses depends on the type of grout material;

the first freeze-thaw-stresses cause the heaviest increase in hydraulic conductivity.

As the testing device is similar to the dimensions of regular hydraulic conductivity test and due to its handling, the procedure can be easily implemented into any geotechnical laboratory. Thus the testing procedure can contribute to quality assurance for shallow geothermal systems.

## VORWORT

Die vorliegende Dissertation ist am Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Angewandte Geothermie unter der Betreuung von Prof. Dr. Ingo Sass entstanden. Für seine zielgerichtete Unterstützung, das kritische Hinterfragen, die Diskussionen und seinen beständigen Zuspruch bedanke ich mich sehr. Die Zweitbetreuung der Arbeit wurde durch Prof. Dr. Lutz Müller von der Hochschule Ostwestfalen-Lippe übernommen. Auch ihm danke ich für die stetige Unterstützung und den Zuspruch.

Besonders möchte ich mich bei Dr. Jens Frank bedanken, der mich während meiner Zeit bei der Knabe Enders Dührkop Ingenieure GmbH und der Frank GeoConsult GmbH stets unterstützt hat. Für seine Zeit, Mühen und die vielen Diskussionen bin ich sehr dankbar. Weiterhin danke ich Dr. Erich Mands für seine initialen Ideen und seine Unterstützung besonders in der Frühphase des Projektes.

Weite Teile der Entwicklung und Validierung des vorgestellten Prüfverfahrens, wurden durch Untersuchungsaufträge der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg unterstützt, wofür ich dankbar bin. Ebenso danke ich der Stiftung der Deutschen Wirtschaft für deren ideelle und materielle Förderung.

Weiterer Dank gilt, Dr. Rühaak, Herrn Seehaus, Dr. Bär, Herrn Homuth, Herrn Stegner, Frau Ross-Krichbaum sowie dem gesamten IAG; Herrn Oel, Dr. Sanner, Herrn Dittrich, Herrn Dibbern und Herrn Fitschen, Dr. Frenzel-Schirmacher und Herrn Hinze, Herrn Beyer, Herrn Gossmann, Herrn Miranda und Herrn Krill, sowie den Studierenden Herrn Arianta, Herrn Wöstefeld, Frau Manns, Herrn Lewang, Herrn Farhang, Herrn Hofheinz, Herrn Tröbst und Herrn Graß für deren tatkräftige Unterstützung.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, meinen Freunden und vor allem meiner Partnerin Catherin, welche mich während der ganzen Zeit gestützt und motiviert haben. Sie haben während der ganzen Zeit zu mir gehalten und geholfen eine klare Sicht zu behalten.

Wesentliche Inhalte der Dissertation wurden gemäß den Vorgaben der Promotionsordnung des Fachbereichs 11 „Material- und Geowissenschaften“ der Technischen Universität Darmstadt in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Kongressen präsentiert.

Publikationen (ISI gelistet):

- (1) Anbergen, H., Frank, J., Müller, L. & Sass, I. (2014), „Freeze-Thaw-Cycles on Borehole Heat Exchanger Grouts: Impact on the Hydraulic Properties“, *Geotechnical Testing Journal*, **37** (4), 639-651
- (2) Anbergen, H., Rühaak, W., Frank, J. & Sass, I. (2014), „Numerical Simulation of a Freeze-Thaw-Testing Procedure for Borehole Heat Exchanger Grouts with FEFLOW“ *Canadian Geotechnical Journal*, (in review)

Publikationen (peer-reviewed):

- (3) Anbergen, H., Rühaak, W., Frank, J., Müller, L. & Sass, I. (2014), „Numerical Simulation of a Freeze-Thaw-Testing Procedure for Borehole Heat Exchanger Grouts with FEFLOW“, World Geothermal Congress 2015, 19.-25.04.2015, Melbourne, Australien (in review)

Tagungsbände:

- (4) Anbergen, H., Frank, J., & Sass, I. (2012), „Quality Assurance of grouting for Borehole Heat Exchangers“, Proceedings of the Twelfth International Conference on Energy Storage – InnoStock 2012, 16.-18.05.2012, Lleida, Spanien
- (5) Anbergen, H. & Sass, I. (2013), „Freeze-Thaw-Behaviour: Observations in Grouted Borehole Heat Exchangers“, Proceedings of the Thirty-eight Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA

Vorträge:

- (6) Anbergen, H., Frank, J. & Sass, I. (2011), „Entwicklung und Inbetriebnahme eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf das Verpressmaterial von Erdwärmesonden“, Der Geothermiekongress 2011, 15.-16.11.2011, Bochum
- (7) Anbergen, H. & Frank, J. (2012), „Einheitliche Materialprüfung für frost-tau-wechselwiderstandsfähiges Verpressmaterial in der oberflächennahen Geothermie – der aktuelle Stand“, 5. Norddeutsche Geothermietagung 17.-18.10.2012, Hannover
- (8) Anbergen, H. & Frank, J. (2012), „Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für den Nachweis der Frost-Tauwechselwiderstandsfähigkeit von Verpressmaterial“, Bundesverband Wärmepumpe e.V. (BWP) – Praxisforum 2012, 08.11.2012, Berlin

- (9) Anbergen, H., Frank, J., Müller, L. & Sass, I. (2013), „Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für den Nachweis der Frost-Tau-Wechselwiderstandsfähigkeit von Verpressmaterial“, Bundesverband Wärmepumpe e.V. (BWP) – Praxisforum 2013, 27.02.2013, Offenburg
- (10) Anbergen, H., Lehr, C., Frank, J., Müller, L. & Sass, I. (2013), „Verpressungen in der oberflächennahen Geothermie – Qualitätssicherung im Feld und im Labor“, Der Geothermiekongress 2013, 12.-14.11.2013, Essen



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Vorgaben .....</b>	<b>3</b>
2.1	Geothermie .....	3
2.1.1	Aufbau und Funktion von Erdwärmesonden .....	4
2.1.2	Bohrarbeiten und Sondeneinbau .....	6
2.1.3	Hinterfüllung der Erdwärmesonde .....	7
2.1.4	Erdgekoppelte Wärmepumpen .....	12
2.1.5	Betriebstemperaturen von erdgekoppelten Wärmepumpen .....	12
2.2	Frost-Tau-Wechsel-Ereignisse bei Erdwärmesonden .....	17
2.2.1	Auswirkungen auf die Hinterfüllung .....	17
2.2.2	Schadensfälle durch Frost-Tau-Wechsel .....	19
2.2.3	Forderung der Widerstandsfähigkeit gegen zyklische Frost-Tau-Belastungen .....	22
2.2.4	Bisherige Untersuchungen von Hinterfüllbaustoffen .....	24
2.3	Mechanismen der Eislinienbildung .....	28
2.4	Bodenmechanik .....	31
2.5	Hydrogeologie .....	36
2.6	Rechtliche Grundlagen .....	38
2.7	Laborvorgaben .....	39
2.8	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit .....	40
<b>3</b>	<b>Vorversuche .....</b>	<b>47</b>
3.1	Materialwahl für die Vorversuche .....	47
3.2	Variation der Abbindezeit und -temperatur .....	48
3.3	Beurteilungskriterien für Hinterfüllbaustoffe .....	50
<b>4</b>	<b>Entwicklung des Frost-Tau-Wechsel-Prüfverfahrens .....</b>	<b>51</b>
4.1	Prüfverfahren für Hinterfüllbaustoffe .....	51
4.1.1	Anforderungen an das Prüfverfahren .....	51
4.1.2	Durchlässigkeitsbeiwert .....	51
4.1.3	Durchlässigkeitsbeiwert nach Frost-Tau-Belastungen .....	52
4.1.4	Radiale Durchfrostung von innen nach außen .....	52
4.1.5	Allseitige Dehnungsbehinderung .....	55
4.2	Messzelle .....	56
4.3	Aufbau der Prüfkörper .....	58
4.4	Probenherstellung und Probenlagerung .....	60

4.5	Peripherie zur Durchführung von Frost-Tau-Wechsel-Versuchen .....	64
4.6	Prüfkonzept.....	65
<b>5</b>	<b>Experimentelle Validierung.....</b>	<b>67</b>
5.1	Allgemeines.....	67
5.2	Kalibrierung .....	69
5.2.1	Materialien für die Kalibrierung .....	69
5.2.2	Implementierung der Messzellen in drei Versuchsanlagen.....	73
5.2.2.1	Anlagentyp I .....	73
5.2.2.2	Anlagentyp II .....	75
5.2.2.3	Anlagentyp III .....	78
5.2.3	Vergleich und Interpretation der Kalibrierungsversuche .....	82
5.3	Einfluss der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel auf die Durchlässigkeit .....	85
5.4	Versuche an Einzelkomponenten von Hinterfüllbaustoffen.....	91
5.5	Visualisierung der Fließwege .....	96
5.5.1	Farbtracer.....	96
5.5.2	Versuchskonzept der Farbtracer Untersuchung .....	97
5.5.3	Versuchsergebnisse der Farbtracer Untersuchung .....	97
5.6	Instationäre Durchlässigkeit .....	100
5.7	Ermittlung der Temperaturverteilung.....	103
5.7.1	Thermographische Temperaturmessung .....	103
5.7.2	Ergebnisse der thermographischen Messungen.....	104
5.8	Bewertung der experimentellen Validierung .....	106
<b>6</b>	<b>Numerische Validierung der Frost-Tau-Wechsel-Simulation .....</b>	<b>109</b>
6.1	Software .....	109
6.2	Annahmen.....	109
6.3	Berechnungsgrundlagen .....	111
6.3.1	Allgemeiner Wärmetransport .....	111
6.3.2	Eisbildungsprozess .....	111
6.3.3	Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Eis.....	112
6.3.4	Wärmekapazität .....	115
6.3.5	Latentwärme .....	117
6.3.6	Dichte des Wassers und des Eises.....	121
6.3.7	Wasserdurchlässigkeit der Matrix .....	122
6.4	Validierung des numerischen Modells .....	123
6.4.1	Benchmark Modelle .....	123
6.4.2	Neumann-Lösung.....	123
6.4.3	Lunardini-Lösung .....	128



6.4.4	Parameterstudien .....	132
6.5	Ergebnis der Finite Elemente Berechnung der Temperaturverteilung .....	136
6.6	Bewertung der numerischen Validierung .....	140
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der Untersuchungen an Hinterfüllmaterialien .....</b>	<b>141</b>
7.1	Versuche an Hinterfüllbaustoffen .....	141
7.2	Charakterisierung der untersuchten Hinterfüllbaustoffe .....	141
7.3	Ergebnisse der Frost-Tau-Wechsel-Untersuchungen .....	143
7.4	Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden .....	147
7.5	Korrelation der Verbundeigenschaften und der Systemdurchlässigkeiten .....	151
<b>8</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>155</b>
8.1	Bewertung der Versuchsergebnisse .....	155
8.2	Bewertung der Frost-Tau-Wechsel-Versuche .....	156
8.3	Bewertung der ermittelten Systemdurchlässigkeiten .....	158
8.4	Anwendung des Prüfverfahrens für die Praxis .....	161
8.5	Qualitätssicherung auf der Baustelle .....	161
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>163</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>167</b>
	Literaturverzeichnis .....	169
	Abbildungsverzeichnis .....	183
	Tabellenverzeichnis .....	191
	Erklärung .....	193
	Lebenslauf .....	195
	Anhang A: Versuchsdokumentation .....	A
	Anhang B: Quellcode des FEFLOW Plug-Ins .....	B
	Anhang C: Temperaturprofil der EWS (Beyer) .....	C
	Anhang D: Datenblätter .....	D



## SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Definition	Einheit
$A_{EWS}$	Anströmfläche des Hinterfüllmaterials einer EWS	$m^2$
$A_{Modell}$	Anströmfläche des Hinterfüllmaterials des Prüfkörpers	$m^2$
$c$	Gravimetrische Wärmekapazität	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$c_{app}$	Scheinbare volumetrische Wärmekapazität	$J\ m^{-3}\ K^{-1}$
$C_U$	Ungleichförmigkeitszahl	-
$c_{eff}$	Effektive gravimetrische Wärmekapazität	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$c_f$	Gravimetrische Wärmekapazität eines Fluides	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$c_{ice}$	Gravimetrische Wärmekapazität des Eises (Ice)	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$c_{soil}$	Gravimetrische Wärmekapazität des Bodens (Soil)	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$c_{water}$	Gravimetrische Wärmekapazität des Wassers (Water)	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$d_{10}$	Korndurchmesser (10% Siebdurchgang)	cm
$d_{60}$	Korndurchmesser (60% Siebdurchgang)	cm
$h$	Mächtigkeit des Bodens	m
$\Delta h$	Hydraulische Druckspiegelhöhendifferenz	m
$H_k$	Durchlässigkeitshysterese	-
$i$	Hydraulisches Gefälle	-
$K$	Horizontaler Erddruckbeiwert	kN
$K_0$	Horizontaler Erdruchedruckbeiwert	kN
$k$	Hydraulic Conductivity (ASTM D 5084, 2010)	$m\ s^{-1}$
$k(t)$	Durchfluss zum Zeitpunkt t	$m\ s^{-1}$
$k_{Anfang}$	Durchfluss zum Start der Messung	$m\ s^{-1}$
$K_{Ende}$	Durchfluss zum Ende der Messung	$m\ s^{-1}$
$k_f$	Durchlässigkeitsbeiwert (DIN 18130-1, 1998)	$m\ s^{-1}$
$l$	Länge des Prüfkörpers	m
$LF$	Latentwärme (Latent Heat of Fusion)	$J\ kg^{-1}$
$m$	Steigung	-
$n$	Anzahl (der Werte)	-
$p$	Auflast	$kN\ m^{-2}$
$q_u$	Druckfestigkeit des Boden/ der Probe	$kN\ m^{-2}$
$s$	Standardabweichung	[ ]
$S_r$	Relative Wassersättigung im Boden	-
$S_{ice}$	Relative Sättigung an Eis	-

$S_{\text{water}}$	Relative Sättigung an Wasser	-
$S_{\text{water, res}}$	Restwassergehalt	-
$T$	Temperatur	°C
$\Delta t$	Zeitintervall	s
$\Delta T$	Temperaturunterschied	K
$\Delta T_{x,y,z}$	Temperaturunterschied in Koordinatenrichtung	K
$T_0$	Temperaturrandbedingung	°C
$T_{\text{water}}$	Obere Grenze des Gefrierintervals	°C
$T_{\text{ice}}$	Untere Grenze des Gefrierintervals	°C
$T_{\text{initial}}$	Ausgangstemperatur des Modells	°C
$U_{\text{EWS}}$	Sondenumfang einer EWS (horizontaler Schnitt)	m
$U_{\text{Modell}}$	Sondenumfang des Prüfkörpers (horizontaler Schnitt)	m
$v$	Filtergeschwindigkeit	$\text{m s}^{-1}$
$v_{\text{eff}}$	Effektive Filtergeschwindigkeit	$\text{m s}^{-1}$
$\Delta V$	Messvolumen	$\text{M}^3$
$VC$	Variationskoeffizient	-
$w$	Formfaktor (Gefrierintervall)	-
$X_{\text{ice}}$	Ortskoordinate der Frostfront ( $T_{\text{water}}$ )	m
$X_{\text{ice, L}}$	Ortskoordinate der Frostfront ( $T_{\text{ice}}$ ) (Lunardini)	m
$X_{\text{water, L}}$	Ortskoordinate der Frostfront ( $T_{\text{water}}$ ) (Lunardini)	m
$z$	Tiefe unter GOK	m
$\alpha$	Neigung gegen die Vertikale	°
$\alpha_T$	Temperatur Korrekturfaktor für die $k_f$ -Berechnung	-
$\alpha_{\text{ice}}$	Temperaturleitfähigkeit von Eis	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\alpha_{\text{ice, L}}$	Temperaturleitfähigkeit von Eis (Lunardini)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\alpha_{\text{ice/water, L}}$	Temperaturleitfähigkeit von Eis und Wasser (Lunardini)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\alpha_{\text{water}}$	Temperaturleitfähigkeit von Wasser	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\alpha_{\text{water, L}}$	Temperaturleitfähigkeit von Wasser (Lunardini)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\beta$	Neigung gegen die Horizontale	°
$\gamma$	Formfaktor (Neumann)	-
$\gamma_L$	Formfaktor (Lunardini)	-
$\gamma_B$	Wichte des Bodens	$\text{kN m}^{-3}$
$\gamma_{B,k}$	Charakteristische Wichte des Bodens	$\text{kN m}^{-3}$
$\delta$	Relativbewegung	m
$\partial$	Differenzierungsoperator	-
$\varepsilon$	Porosität	-

$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{eff}}$	Effektive Wärmeleitfähigkeit	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{ice}}$	Wärmeleitfähigkeit des Eises (Ice)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{soil}}$	Wärmeleitfähigkeit des Bodens (Soil)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{water}}$	Wärmeleitfähigkeit des Wassers (Water)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\rho$	Dichte	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_{\text{ice}}$	Dichte des Eises	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_{\text{soil}}$	Dichte des Bodens	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_{\text{water}}$	Dichte des Wassers	$\text{kg m}^{-3}$
$\sigma_1$	Normalspannung in positiver Z-Richtung	$\text{N mm}^{-2}$
$\sigma_2$	Normalspannung in positiver X-Richtung	$\text{N mm}^{-2}$
$\sigma_3$	Normalspannung in positiver Y-Richtung	$\text{N mm}^{-2}$
$\sigma_r$	Radialspannung in X_Y_Ebene	$\text{N mm}^{-2}$
$\sigma_z$	Normalspannung in positiver Z-Richtung	$\text{N mm}^{-2}$
$\varphi$	Innerer Reibungswinkel des Bodens	°
$\Sigma$	Summe	-
$\Delta$	Laplace-Beltrami-Operator	-
$\nabla$	Nabla-Operator	-
$\psi_L$	Formfaktor	-
$\Omega_{\text{rel}}$	Relativer Fehlerwert	-
$\Omega_{f(x)}$	Maximaler Fehlerwert	[ ]
$\Omega_x$	Fehlerwert einer Variablen	[ ]



## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Definition
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>BWP</b>	Bundesverband Wärmepumpe e.V.
<b>BSU</b>	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg
<b>C<sub>2</sub>(A,F)</b>	Calumniaferit
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Tricalciumaluminat
<b>C<sub>2</sub>S</b>	Dicalciumsilicat
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Tricalciumsilicat
<b>CIF</b>	Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw
<b>CSH</b>	Calciumsilicathydrate
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung e.V.
<b>DVGW</b>	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.
<b>EWS</b>	Erdwärmesonde
<b>FTW</b>	Frost-Tau-Wechsel
<b>GOK</b>	Geländeoberkante
<b>GtV</b>	Bundesverband Geothermie e.V.
<b>KIT</b>	Karlsruher Institut für Technologie (ehemals TH Karlsruhe)
<b>ÖNORM</b>	Österreichische Norm des Austrian Standards Institute
<b>PE</b>	Polyethylen
<b>PE-HD</b>	Hochdichtes Polyethylen (auch HDPE)
<b>PE-RT</b>	Polyethylen (erhöhter Temperaturwiderstand)
<b>PE-X</b>	Vernetztes Polyethylen
<b>PVC</b>	Polyvinylchlorid
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error (Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung)
<b>SIA</b>	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
<b>SLULG</b>	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
<b>SSU</b>	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin
<b>TRT</b>	Thermal Response Test
<b>UMBW</b>	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
<b>USA</b>	Vereinigte Staaten von Amerika
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
<b>WHG</b>	Wasserhaushaltsgesetz





## 1 EINLEITUNG

Die häufigste Ausführung von oberflächennahen Geothermieranlagen in Deutschland ist die Kombination von Wärmepumpen mit vertikalen Erdwärmesonden (EWS) [PK Geothermie 2011]. Diese werden in der Regel mit Wärmeträgerflüssigkeiten mit Frostschutzzusätzen betrieben, wodurch der Betrieb mit Wärmeträgerfluidtemperaturen unter 0 °C möglich wird. Der Betrieb mit Fluidtemperaturen unter 0 °C kann planmäßig zur Abdeckung von Spitzenlasten stattfinden [VDI 4640-2 2001] oder unplanmäßig aufgrund von Fehlfunktionen, ungünstigem Nutzerverhalten, Unterdimensionierung und anderen Gründen [DGG & DGGT 2014]. In Abhängigkeit der Dauer und der Häufigkeit der Arbeitszyklen kann es in der Hinterfüllung zu einem Absinken der Temperaturen unter den Gefrierpunkt des Porenwassers kommen. Das Porenwasser ändert seinen Aggregatzustand und wird zu Eis. Mit der Zeit, wenn der Wärmeentzug geringer wird, wird das Eis wieder schmelzen. Dieses Phänomen wird als Frost-Tau-Wechsel (FTW) bezeichnet. Diese FTW stellen einen bautechnisch kritischen Lastfall dar. Wissenschaftlich abschließend wurde bislang nicht geklärt, welche Auswirkungen die FTW-Belastungen auf die hydraulische Integrität der Hinterfüllung haben. Bisherige Untersuchungen an Hinterfüllmaterialien haben sich auf bestehende Normen bezogen, welche die Frostempfindlichkeit von Beton oder Naturstein untersuchen [Anbergen et al. 2014a]. Ein normiertes Prüfverfahren speziell für Hinterfüllbaustoffe für EWS, die i.d.R. aus einer Mischung von Zement mit Quarzsanden und/oder Bentoniten zusammengesetzt sind, unter FTW-Einfluss, existiert bis dato nicht.

Bei der Untersuchung von Hinterfüllmaterialien unter Anwendung der bestehenden Normen für Beton oder Naturstein, werden die für diesen Baustoff hydraulischen, mechanischen und thermischen Anforderungen unzureichend beachtet [Anbergen et al. 2011a]. Dies führt zu Versuchsergebnisse, die Fehlinterpretationen des Materialverhaltens ermöglichen. Die Folgen daraus sind zum einen Fehleinschätzungen der tatsächlichen Materialeigenschaften der Hinterfüllung von EWS, was zu folgeschweren Schadenfällen führen kann. Zum anderen besteht bei den Genehmigungsbehörden die Rechtsunsicherheit hinsichtlich der Zulassung oder Nichtzulassung eines Hinterfüllbaustoffes wenn dabei der Frost-Tau-Wechselwiderstand Relevanz hat. Die vorliegende Arbeit wurde deshalb auch von der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg unterstützt.

Dies gab Anlass, ein Prüfverfahren speziell für die Untersuchung des Einflusses von zyklischen Frost-Tau-Belastungen auf die hydraulische Durchlässigkeit von Hinterfüllbaustoffen für EWS zu entwickeln.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines auf die speziellen Anforderungen an das Hinterfüllmaterial angepassten Prüfverfahrens vorgestellt und bewertet, welches zudem eine praxisnahe Anwendung ermöglicht. Da aus hydrogeologischer Sicht die Hauptanforderung an die Hinterfüllung die hydraulische Integrität ist, liegt der Fokus des Verfahrens auf der hydraulischen Durchlässigkeit und misst diese direkt. Der Aufbau und die Funktionsweise der entwickelten Messapparatur sowie der zugehörigen Infrastruktur werden detailliert beschrieben. Neben einer Kalibrierung des Verfahrens und dem Vergleich der Messungen in drei Erdbaulaboratorien, werden Ergebnisse von Versuchen an unterschiedlichen Hinterfüllbaustoffen dargestellt. Zur Validierung des Verfahrens wurden experimentelle und numerische thermische Untersuchungen durchgeführt. Im Zuge der numerischen Berechnung wurde ein Algorithmus in Form eines Plug-Ins für eine Finite Elemente Modellierungssoftware (FEM) entwickelt, welcher die Abbildung von Phasenwechselvorgängen ermöglicht. Das Plug-In modifiziert die maßgeblichen thermischen und hydraulischen Eigenschaften des Wassers und inkorporiert die beim Phasenwechsel freigesetzte Kristallisationswärme.

Der Inhalt gliedert sich daher in folgende Themen:

- Grundlagen und Vorversuche (Kap. 2 und 3)
- Entwicklung des Messverfahrens (Kap. 4)
- Experimentelle Validierung (Kap. 5)
- Numerische Validierung (Kap. 6)
- Ergebnisse der Frost-Tau-Wechsel-Untersuchungen (Kap. 7)
- Diskussion (Kap. 8)

Die Funktion und Anwendung des Messverfahrens werden diskutiert und es werden Vorschläge für eine Implementierung des Prüfverfahrens in die Qualitätssicherung von Hinterfüllmaterialien für EWS gegeben.

## **2 GRUNDLAGEN UND VORGABEN**

### **2.1 Geothermie**

Als Geothermie wird die Nutzung der Erdwärme als Energieträger verstanden [VDI 4640-1 2010]. Im Jahr 2011 betrug die in Deutschland installierte geothermische Leistung 3500 MW<sub>t</sub> [Ganz et al. 2013]. Bei der Nutzung von Erdwärme für die Energiegewinnung wird grundsätzlich zwischen der tiefen und der oberflächennahen Geothermie unterschieden. Die Tiefenbegrenzung für die Definition oberflächennaher Geothermieranlagen wird häufig bei einer Grenztiefe von 400 m unter Geländeoberkante (GOK) gezogen. Unter 400 m ist der Bereich der (mittel-) tiefen Geothermie. Die mitteltiefe Geothermie wird für den Bereich zwischen 400 m bis etwa 1500 m Tiefe definiert. Tiefere Anlagen werden der tiefen Geothermie zugeschrieben Geothermie [Sass 2010, Stober & Bucher 2012, VBI 2012, DGG & DGGT 2014].

Im Allgemeinen steigt mit zunehmender Tiefe die Bodentemperatur an. Gleichzeitig erhöht sich auch der ingenieurtechnische Aufwand, das vorhandene Energiepotenzial zu erschließen. Die vorhandene Energie kann dabei zur Stromproduktion oder Wärmegewinnung genutzt werden. Aufgrund des höheren finanziellen Aufwandes für tiefe Geothermieprojekte ist deren Anzahl gering, verglichen mit der Anzahl an oberflächennahen Geothermieprojekten [Stober & Bucher 2012]. Ausführliche Informationen zu den Bereichen, Technologien und Wirkprinzipien der tiefen und mitteltiefen Geothermie können der Fachliteratur entnommen werden [u.a. VBI 2010].

Oberflächennahe Geothermiesysteme sind Niedrigenthalpiesysteme. Aufgrund der relativ geringen Tiefe und den damit verbundenen niedrigen Temperaturen eignen sie sich, bis auf wenige Ausnahmen, z.B. wie in Larderello, zur Wärmegewinnung jedoch nicht zur Verstromung der thermischen Energie. Weiterhin sind neben dem Heizbetrieb auch der Kühlbetrieb sowie die thermische Energiespeicherung mit oberflächennahen System grundsätzlich möglich [VDI 4640-1 2010]. Zu den Ausführungsformen der oberflächennahen Geothermie zählen neben Erdwärmsonden auch Erdwärme- oder auch Flachkollektoren, geothermische Brunnenanlagen als auch aktivierte Bauteile, wie z.B. Energiepfähle. Ein detaillierter Überblick über die verschiedenen Technologien kann ebenfalls der Fachliteratur entnommen werden [VBI 2012, DGG & DGGT 2014]. Grundsätzlich ist zwischen offenen und geschlossenen Systemen zu unterscheiden. Offene Systeme sind z.B. geothermische Brunnenanlagen, in denen Wasser gefördert

wird. Dabei wird das Grundwasser direkt als Wärmeträgermedium verwendet. Im Gegensatz dazu wird das Grundwasser bei geschlossenen Systemen nicht gefördert, sondern verbleibt im Grundwasserleiter. Geschlossene Systeme sind daher weitestgehend standortunabhängig [Kölbel 2010]. Die häufigste Ausbauvariante geschlossener oberflächennaher Geothermiesysteme ist die Erdwärmesonde [Stober & Bucher 2012]. Erdwärmesonden sind grundsätzlich sowohl zum Heizen, als auch zum Kühlen einsetzbar.

### **2.1.1 Aufbau und Funktion von Erdwärmesonden**

In Deutschland werden Erdwärmesonden als Einfach-U-, Doppel-U- oder die Koaxialsonde ausgeführt. [VDI 4640-2 2001]. Dabei wurden und werden die meisten EWS als Doppel-U-Sonde hergestellt [u.a. Rumohr 2009, DGG & DGGT 2014], wie auch 2013 im Stadtgebiet Hamburg ca. 80 Prozent der EWS als Doppel-U-Sonden ausgebaut wurden [BSU 2014d]. Dazu wird eine (Doppel-) Schlaufe aus einem Rohr in ein Bohrloch eingelassen und der Bohrlochringraum wird mit einem Hinterfüllmaterial verfüllt. Die Sondenrohre haben standardmäßig drei unterschiedliche Außendurchmesser: 25, 32 und 40 mm, wobei 25 mm eher unüblich ist [SLULG 2011]. In Abhängigkeit vom verwendeten SONDENDURCHMESSER muss ein passender Bohrdurchmesser für die Bohrung ausgewählt werden.

In der Regel werden Rohrleitungen aus hochdichtem Polyethylen (HDPE) oder vernetztem Polyethylen (PE-X), sowie Rohre mit einem höheren Temperaturwiderstand (PE-RT) verwendet [IKV 2013]. Durch die Sonde strömt eine Wärmeträgerflüssigkeit, die im Bohrloch erwärmt oder abgekühlt wird. Ein schematischer Aufbau ist der Abbildung 1 zu entnehmen.

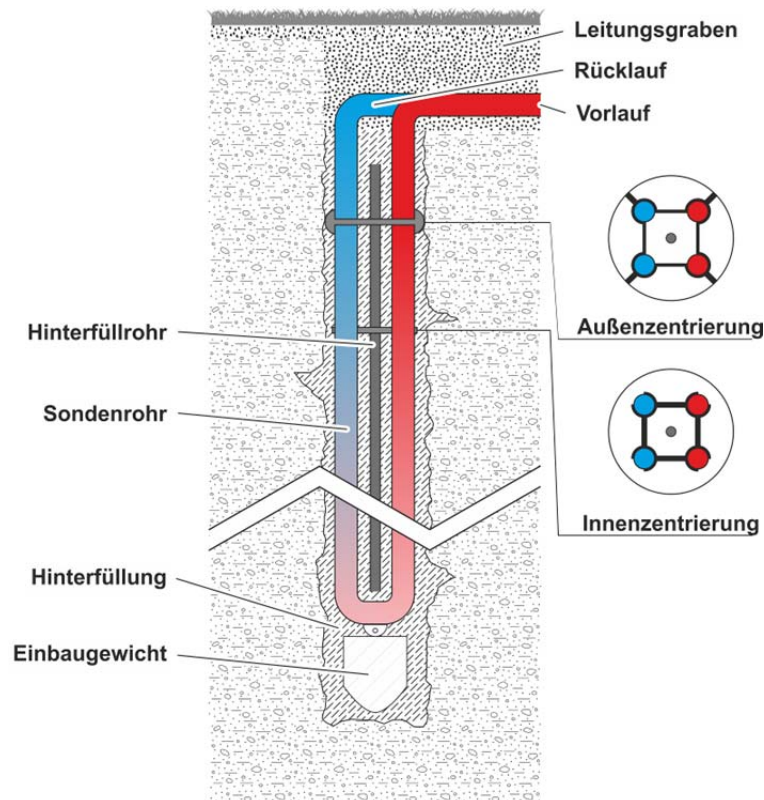


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Erdwärmesonde (Doppel-U-Sonde, im Vertikalschnitt ein U-Sondenstrang verdeckt) nach DGG & DGGT [2014]

Der Sondenkreislauf wird i.d.R. mit einer Wärmepumpe verbunden. Diese temperiert die Wärmeträgerflüssigkeit, so dass die Wärmeträgerflüssigkeit während der Durchströmung der EWS dem umgebenden Gebirge Wärme entzieht oder abgibt. Die Temperaturdifferenz der Wärmeträgerflüssigkeit vom Verlassen der Wärmepumpe (Rücklauf) und vom Ankommen an der Wärmepumpe (Vorlauf) wird energetisch genutzt, um z.B. das Gebäude zu heizen oder kühlen.

Für die Berechnung des Wärmeentzugs wird eine EWS häufig als linienförmiges Bauwerk betrachtet [VDI 4640-2 2001]. Diese Vereinfachung kann getroffen werden, da das Verhältnis von EWS-Länge zum Durchmesser groß ist [DGG DGGT 2014]. Häufig wird der Ansatz nach Ingersoll & Plass [1948] herangezogen. Dieser basiert auf der Kelvin'schen Linienquellen-Theorie [Lehr & Sass 2014]. Es handelt sich dabei um eine analytische Näherung, die häufig für die Auswertung von Geothermal Response Tests (GRT) verwendet wird [Sass & Lehr 2011] und auch von der VDI 4640-2 [2001] als Berechnungsgrundlage angegeben wird. Ein GRT ist ein Messverfahren, das für die in-situ-Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit, der ungestörten Untergrundtemperatur, der Wärmekapazität und des thermischen Bohrlochwiderstandes konzipiert wurde [DGG & DGGT 2014]. Es wird über eine Wärmepumpe ein Heizimpuls in die EWS

gegeben und die thermische Reaktion der EWS ermittelt. Dazu werden die Temperatur, der Volumenstrom und die Heizleistung aufgenommen und ausgewertet. Die Differenz zwischen Vor- und Rücklauf ergibt die über die Sondenlänge integrierte Abkühlung [Sanner et al. 1999]. Die Messung muss so lange laufen, bis die Werte quasistationär sind [DGG & DGGT 2014]. Für kürzere Versuchszeiten gibt es andere Berechnungsansätze, die eine instationäre Auswertung eines GRT zulassen. Dazu gehört der Ansatz, die EWS anstatt als Linienquelle als Zylinderquelle zu berechnen [Lehr & Sass 2014]. Dadurch können in kürzerer Zeit die maßgeblichen thermischen Parameter einer EWS bestimmt werden.

### **2.1.2 Bohrarbeiten und Sondeneinbau**

Für die Errichtung einer oberflächennahen, vertikalen EWS wird zuerst ein Bohrloch hergestellt [Stober & Bucher 2012]. Die genaue Tiefe wird durch die Planung, Auslegung und Genehmigung der EWS bestimmt. Dabei ist es in Abhängigkeit der geologischen Gegebenheiten möglich, dass unterschiedliche Grundwasserstockwerke durchörtert werden [PK Geothermie 2011]. Nach Erreichen der Teufe wird die wassergefüllte Sonde mit einem zusätzlichen Verfüllrohr und Einbaugewicht in das Bohrloch eingelassen (Abbildung 2). Dabei gilt es zu beachten, dass die gesamte EWS im Bündel von einer Haspel in das Bohrloch eingebracht werden muss und ein dementsprechender freier Ringraum zur Verfügung stehen muss. Ein typischer Bohrl Lochdurchmesser einer Erdwärmebohrung für eine EWS mit Doppel-U-Sonde der Abmessungen 32 x 2,9 mm ist 152 mm, wodurch im Idealfall ein freier Ringraum von mindestens 30 mm um das Sondenbündel besteht [u.a. SLULG 2011, DGG & DGGT 2014]. Es werden jedoch sowohl kleinere, als auch größere Bohrdurchmesser verwendet [UMBW 2012]. Bezüglich der Mindestüberdeckung des Sondenbündels durch die Hinterfüllung ist zu erwähnen, dass das Sondenbündel trotz der Verwendung von Abstandshaltern nicht entlang der Bohrl Lochachse verläuft [Riegger 2010, Sass 2010]. Es ist tendenziell mit einer ungeordneten Sondenanordnung zu rechnen, da die Fixierung von Abstandshaltern technisch schwer umsetzbar ist und die mechanischen Einwirkungen beim Einbringen des Sondenbündels Ausmitten begünstigen. Dies wurde durch Felduntersuchungen belegt [Riegger 2010].



Abbildung 2: Bohrgerät und Bohrarbeiten einer Erdwärmebohrung (links) und Überlauf der Bohrspülung (rechts). (Abbildungen mit freundlicher Genehmigung der Frank Geoconsult GmbH, 2014)

Nach Einbringung der Sonde, erfolgt die Hinterfüllung des Bohrlochringraumes im Kontraktorverfahren durch das Verfüllrohr von unten nach oben [Stober & Bucher 2012]. Dadurch soll sichergestellt werden, dass es zu einer lückenlosen Hinterfüllung des Ringraumes kommt und dass die hydraulische Integrität eventuell durchörterter Grundwasserstauer wieder hergestellt wird. Im Anschluss an die Hinterfüllung folgen Druck- und Durchflussprüfungen, welche nach den einschlägigen Regelwerken durchzuführen sind [siehe VDI 4640-2 2001, DGG & DGGT 2014].

### 2.1.3 Hinterfüllung der Erdwärmesonde

In Deutschland müssen Erdwärmesonden nach der gültigen VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 [2001] hinterfüllt werden. Als Hinterfüllbaustoff werden i.d.R. Produkte auf Basis von Zement und quellfähigen Tonanteilen mit Wasser zu einer Suspension angemacht. Als Zuschlagsstoff wird häufig Quarz in verschiedenen Kornfraktionen als Füllstoff und als thermisch verbessernder Zusatz eingesetzt [VDI 4640-2 2001]. Es werden aber auch andere Zusätze wie Graphit zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit genutzt [Ebert et al. 2000]. Grundsätzlich sind auch Suspensionen mit nur Teilkomponenten oder anderen

Stoffen möglich, wie Tonpellets oder reine Zementsuspensionen. Diese bilden jedoch nicht den Hauptanteil des Marktes ab.

Die Zementanteile bilden ein festes Gefüge, welches primär für die Orts- und Erosionsstabilität benötigt wird. Der Hinterfüllkörper muss auch bei strömendem Grundwasser orts-, erosions- und suffusionsstabil bleiben. Bei deutschen Normzementen ist Portlandzementklinker der wichtigste Bestandteil für die Festigkeitsentwicklung. Dieser reagiert hydraulisch und ist für die Bildung der Calciumsilicathydrate (CSH) verantwortlich [VDZ 2002]. Die CSH-Phasen entstehen aus den Klinkerphasen Tricalciumsilicat ( $C_3S$ ) und Dicalciumsilicat ( $C_2S$ ). Die CSH-Bildung aus  $C_3S$  findet relativ schnell statt und führt zu einer hohen Frühfestigkeit des Zement-Gemisches. Der Prozess der Hydratation der  $C_2S$  findet deutlich langsamer statt. Die Festigkeitsentwicklung verläuft über Wochen bis Monate [Czernin 1960]. Die weiteren Komponenten Tricalciumaluminat ( $C_3A$ ) und Calciumaluminatferrit ( $C_2(A,F)$ ) haben einen deutlich geringeren Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung [VDZ 2002].

Die Hydratation ist eine exotherme Reaktion. Je schneller die Hydratation stattfindet, desto mehr Energie wird in kürzerer Zeit freigesetzt. Die Hydratationswärme bei Hinterfüllbaustoffen wird nach DGG & DGGT [2014] so begrenzt, dass der Baustoff unter adiabatischen Bedingungen maximal 50 °C aufweisen darf. Je langsamer die Reaktion abläuft, desto geringere Zwangsspannungen entstehen im Körper. Dies verringert das Risiko der Bildung von Rissstrukturen. Bei schnell hydratisierenden Zementen kann es aufgrund der schnellen Umwandlung zu lokalen Wassersättigungen unter 100 % in dem erhärtenden Zementgefüge kommen. Ein lokales Austrocknen hat eben solche Zwangsspannungen zur Folge, wodurch eine Rissbildung möglich wird. Weiterhin weisen langsam hydratisierende Zemente grundsätzlich geringere Schwindmaße auf [Schäffel 2009]. Für Hinterfüllbaustoffe eignen sich daher besonders langsam hydratisierende Zemente, die jedoch eine ausreichende Frühfestigkeit für die Erosionsstabilität aufweisen. Die einaxiale Zylinderdruckfestigkeit (28 Tage) nach DIN 18136 [2003] soll größer 1 N mm<sup>-2</sup> betragen [DGG & DGGT 2014].

Die in dem ausgehärteten Gefüge eingelagerten Tonminerale wirken sich positiv, d.h. in diesem Fall senkend, auf die hydraulische Durchlässigkeit aus [Abichou et al. 2004], besonders nach eventuellen Schädigungen des Zementgerüsts. Materialien ohne quellfähige Tonminerale können ebenfalls eine geringe hydraulische Durchlässigkeit aufweisen, jedoch zeigen diese im Regelfall einen deutlich höheren, rissbedingten, Anstieg der Durchlässigkeit auf, als Materialien mit quellfähigen Tonanteilen.



Aus Qualitätsgründen werden von den Genehmigungsbehörden häufig nur noch Fertigprodukte zugelassen, welche als werksgemischte Trockenware auf die Baustelle geliefert und vor Ort mit Wasser zu einer Hinterfüllsuspension angemacht werden. Die Mischung der einzelnen Komponenten auf der Baustelle entspricht nicht mehr dem Stand der Technik [u.a. SSU 2012, Seibel 2013], auch wenn dies noch in der VDI-Richtlinie 4640-2 aus dem Jahr 2001 als mögliche Variante vorgestellt wird [VDI 4640-, 2001].

Die angemachte Suspension wird im Kontraktorverfahren, von unten nach oben, in das Bohrloch eingebracht. Dazu wird ein Verfüllrohr verwendet, welches zusammen mit dem Sondenbündel eingebracht wurde. Durch das Einbringen der Suspension im Kontraktorverfahren wird ein Entmischen der Suspension während eines freien Falls verhindert und es wird das Risiko von eventuellen Hohlraum- oder Brückenbildungen minimiert [u.a. Stober & Bucher 2012]. Idealerweise wird so eine lückenlose Hinterfüllung der EWS erreicht, welche neben dem Schutz der Sonde, im Wesentlichen zwei Hauptaufgaben erfüllt [VDI 4640-2 2001]:

#### *1) Wärmetransport*

Einerseits soll ein möglichst guter thermischer Kontakt zum umgebenden Gebirge hergestellt werden. Dadurch soll thermische Energie mit einem möglichst geringen Widerstand vom anstehenden Boden zum Wärmetauscher geleitet werden (Heizfall) oder abgegeben werden (Kühlfall). Dies wird erreicht, indem die Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials möglichst hoch bzw. der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gebirges angepasst ist.

#### *2) Fließwiderstand*

Andererseits hat die Suspension das Bohrloch zu hinterfüllen, um einen eventuellen Schadstoffeintrag und eine damit verbundene Kontamination zu verhindern oder ungewollten vertikalen Wasseraustausch zu minimieren. Dabei ist grundsätzlich zu beachten, dass der Fließwiderstand in Bereichen von Grundwassergeringleitern aus hydrogeologischer Sicht als besonders kritisch zu erachten ist (Abbildung 3), da es hier zu hohen hydraulischen Gradienten kommen kann und somit auch zu einem erhöhten Flüssigkeitstransport. Dies kann neben einer Kontamination von Grundwasserleitern auch zu möglichen Erosionen und damit verbundenen Setzungen führen. Eine nachteilige Veränderung des Grundwassers gilt es dabei auszuschließen bzw. zu minimieren [WHG 2009, PK Geothermie 2011].

In der VDI 4640-2 [2001] wird für diesen Sachverhalt der Begriff *Abdichtfunktion* verwendet, um zu verdeutlichen, dass der Hinterfüllbaustoff die Funktion eines

Widerstandes gegen einen möglichen Stoff- und Flüssigkeitstransport zu übernehmen hat. Wie hoch dieser Widerstand zu sein hat wird nicht definiert und ist von den geologischen Gegebenheiten abhängig. Im eigentlichen Sinne handelt es sich dabei jedoch nicht um ein Material, welches *dicht* ist, sondern eine entsprechend geringe Durchlässigkeit aufweist. Der verwendete Begriff einer *Abdichtfunktion* suggeriert daher einen Zustand, der technisch mit dem verwendeten Material nicht möglich ist. Daher ist es zweckmäßig, stattdessen die Terminologie der DIN-Norm für die hydraulische Durchlässigkeit von Böden nach DIN 18130-1 [1998] anzuwenden. Die Durchlässigkeitsbereiche werden unter Kap. 2.5 dargestellt und definiert von sehr schwach durchlässig bis sehr stark durchlässig.

Der Fließwiderstand der Hinterfüllung einer EWS ist besonders in Bereichen eventuell durchörterter Grundwasserstauer von Interesse. Hier besteht ein besonderes Schadenspotenzial bei einer insuffizienten Integrität der Hinterfüllung, da es zu einem übermäßigen Wasser- und Massenaustausch zweier oder mehrerer Grundwasserstockwerke kommen kann. Dadurch kann es zu Kontaminationen oder zu Setzungsschäden aufgrund von Erosion kommen [Stober & Bucher 2012, Anbergen et al. 2014a, DGG & DGGT 2014]. Mögliche Schadensszenarien sind in der Abbildung 3 aufgezeigt.

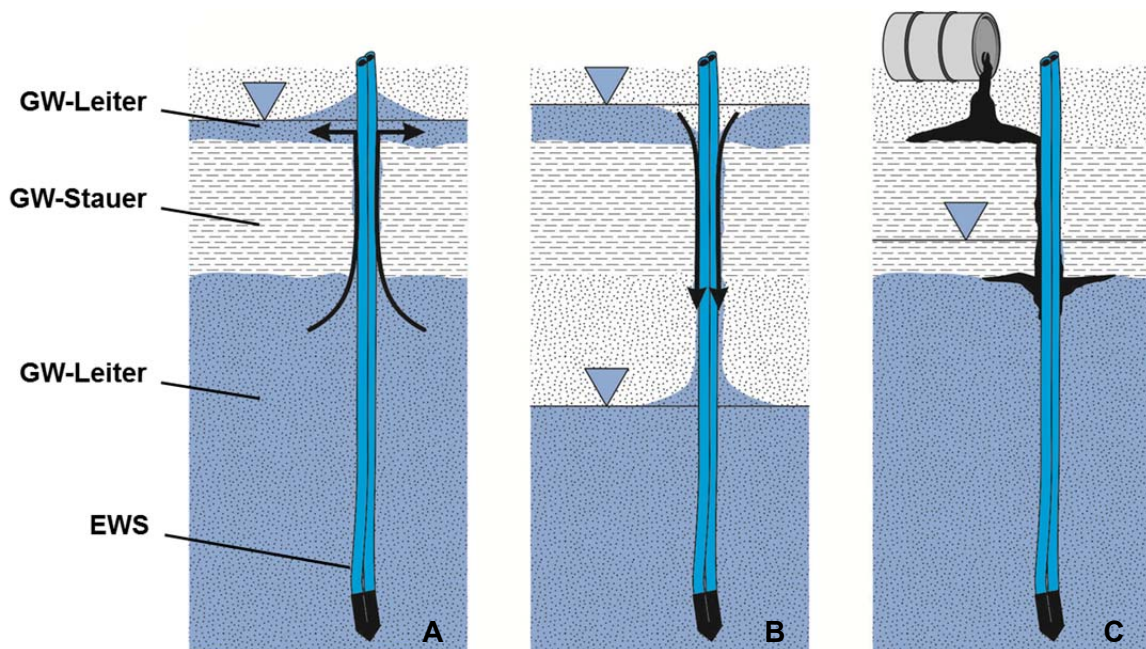


Abbildung 3: Mögliche Schadensfälle aufgrund mangelhafter Hinterfüllung bei Erdwärmesonden. Darstellung von artesischen Grundwasserverhältnissen (A), einem hydraulischen Kurzschluss zweier Grundwasserstockwerke (B) und einem vertikalen Kontaminationspfad durch Schmutzeintrag von der GOK (C) [verändert nach DGG & DGGT 2014].

Die abgebildeten Szenarien müssen nicht zwingend zu einem sanierungsbedürftigen Schaden führen. So ist es nahezu unumgänglich, dass es bei einer Durchörterung eines Grundwasserstauers und der anschließenden Hinterfüllung des Bohrlochs, zu einem erhöhten vertikalen Grundwasserfluss kommt. Die auftretenden Fließgeschwindigkeiten und Durchflussmengen müssen stets im Verhältnis zu den geologischen Randbedingungen bewertet werden. Es sind Einzelfälle möglich, in denen eine stark durchlässige Hinterfüllung ein wünschenswerter Zustand sein kann. Dieses kann z.B. für stark durchlässige, homogene Böden ohne Gefährdungspotenzial gelten. Die Hinterfüllung würde die Gesamtdurchlässigkeit des Bodens nicht negativ verändern, jedoch durch das strömende Grundwasser einen deutlich erhöhte konduktiven Wärmetransport verzeichnen. So gilt es stets den Einzelfall zu betrachten. Solche Ausnahmen beeinflussen jedoch die grundsätzliche Forderung nach einer integren Hinterfüllung nicht. Mögliche Gründe für eine mangelhafte Hinterfüllung sind in folgender Tabelle 1 aufgeführt.

*Tabelle 1: Darstellung von Schadensszenarien, die zu einer mangelhaften Hinterfüllung führen können, verändert nach Anbergen et al. [2013b]*

<b>Ausgangszustand</b>	<b>Schadensursache</b>
Während der Bohrarbeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mechanische Einwirkung während des Einbaus</li> <li>- Ineinanderbohren benachbarter Bohrungen</li> <li>- Überhöhter Differenzdruck während des Hinterfüllvorganges</li> <li>- Geologische Gegebenheiten (z.B. Horizonte quellfähiger Tone)</li> </ul>
Bei hoher Gebirgsdurchlässigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausspülen der Hinterfüllsuspension durch fließendes Grundwasser, bevor diese erhärtet</li> <li>- Abfließen der Suspension in das Gebirge</li> </ul>
Bei großen Druckpotenzialunterschieden durchörterter Grundwasserleiter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vertikales Ausspülen der Suspension, bevor oder nachdem diese erhärtet</li> </ul>
Beim Betrieb der EWS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frost-Tau-Wechselbelastungen auf ein nicht widerstandsfähiges Hinterfüllmaterial</li> </ul>

Die Anforderungen an die Hinterfüllung müssen unter allen möglichen Betriebszuständen und auch nach der Außerbetriebnahme einer Erdwärmesonde sichergestellt werden.

Erdwärmesonden werden häufig mit Wärmeträgerflüssigkeiten betrieben, die Frostschutzmittelzusätze enthalten. Bei einer eventuellen Leckage der Sondenrohre würde diese in den Untergrund eintreten, was es zu vermeiden gilt. Die Hinterfüllung einer EWS soll nicht nur die Sonde vor äußeren mechanischen Einwirkungen schützen, sondern auch den Austritt von Wärmeträgerflüssigkeit reduzieren [Mehnert 2004]. Die Hinterfüllung soll dabei idealer Weise eine umhüllende Schutzschicht darstellen, was jedoch aufgrund der Sondenrohrlage nur teilweise zutrifft [Riegger 2010].

#### **2.1.4 Erdgekoppelte Wärmepumpen**

Eine vollständig hergestellte Erdwärmesonde wird anschließend mit der Haustechnik verbunden. In der Regel werden Erdwärmesonden mit Wärmepumpenkreisläufen kombiniert. Dabei wird ein Wärmeträgermedium, i.d.R. Wasser oder ein Wasser/Frostschutzmittel-Gemisch, meist auf Glykolbasis, von der Wärmepumpe durch die Erdwärmesonde zurück zur Wärmepumpe transportiert [Mehnert 2004, Urbaneck 2012]. Das Wärmeträgermedium nimmt im Heizfall bei dem Durchströmen der Erdwärmesonde Wärme aus dem umgebenden Gebirge auf oder gibt im Kühlfall Wärme an die Umgebung ab. Üblicherweise wird für den effizienten Betrieb der Wärmepumpe je nach Anlage ein Temperaturhub, das heißt eine Temperaturdifferenz zwischen Rücklauf und Vorlauf der Wärmepumpe, von wenigen Kelvin benötigt [Ochsner 2009, ISE 2011, Wenzel 2012]. Die thermische Energie wird über einen Wärmetauscher an einen geschlossenen Wärmepumpenkreislauf übergeben.

#### **2.1.5 Betriebstemperaturen von erdgekoppelten Wärmepumpen**

Die Betriebstemperaturen einer EWS-Anlage hängen von mehreren Faktoren ab, diese sind u.a.: Die spezifische Auslegung der Anlage, die geologischen und geothermischen Gegebenheiten, der tatsächliche Energiebedarf, die Betriebsart oder die klimatischen Bedingungen. Dabei bestimmt maßgeblich die Art des verwendeten Wärmeträgermediums und die absoluten Temperaturen die Leistungsfähigkeit. Die Verwendung von Wasser im Sondenkreislauf ist aufgrund der guten Materialeigenschaften des Wassers, wie Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Viskosität, aus thermodynamischer Sicht sinnvoll [Urbaneck 2012]. Jedoch beschränkt der Gefrierpunkt des Wassers die Minimaltemperaturen der Anlage. Um sicherzustellen, dass es in der Wärmepumpe nicht zu Schadensfällen aufgrund von Eisbildung kommt, wird beim Betrieb mit Wasser die Rücklauftemperatur auf minimal 3 °C bzw. 4 °C beschränkt [Wenzel 2012]. Da während des Heizbetriebes einer Erdwärmesonde die Temperatur im Nahfeld der Sonde absinkt, kann es unter Umständen zu einem insuffizienten Wärmeentzug kommen. Dies bedeutet,

dass eine zu geringe Wärmemenge dem Untergrund entnommen wird und somit die Wärmepumpe nicht auslegungsgemäß arbeiten kann. Die Folge sind höhere Taktzahlen der Wärmepumpe (Abbildung 5) mit einem dementsprechend höheren Energieverbrauch an elektrischer Antriebs- und Prozessenergie, bis hin zum Abschalten der Wärmepumpe aufgrund von Überlastung [Wenzel 2012]. Als Konsequenz würde in diesen Extremsituationen entweder die Heizleistung über rein elektrische Energie bereitgestellt werden, oder über ein konventionelles Heizungssystem zugeheizt werden müssen, um den thermischen Energiebedarf zu decken. Letztere Variante würde zu deutlich erhöhten Investitionskosten führen, wodurch in den meisten Fällen die Wirtschaftlichkeitsberechnungen einer EWS-Anlage so stark beeinflusst werden, dass diese nicht mehr konkurrenzfähig wäre [Mands 2012].

Ein anderer Ansatz ist der Betrieb mit Wasser-Frostschutzmittel-Gemischen. Bei dem Betrieb mit Frostschutzzusätzen (wie z.B. Monoethylenglykol, Propylenglykol, Ethanol oder Kaliumcarbonat) können niedrigere Temperaturen zugelassen werden, ggf. auch Temperaturen bis unter 0 °C [Urbanek 2012]. Im Stadtgebiet Hamburg wurden 2013 alle Anlagen für den Betrieb mit einem der oben genannten Frostschutzmittel genehmigt. Dabei sind die Glykoldmischungen mit ca. 85 Prozent vertreten [BSU 2014d].

Bei der Verwendung von Frostschutzzusätzen sind Einflüsse wie Korrosivität, Umweltverträglichkeit und biologische Abbaubarkeit zu beachten [Hillerns 1999, Mehnert 2004]. Die Wasser-Glykoldgemische sind in die Wassergefährdungsklasse WGK 1, als schwach wassergefährdend, einzuordnen [VwVwS 1999, DGG & DGGT 2014]. Einen Austritt des Glykols in das Grundwasser gilt es daher zu unterbinden.

Durch die Verwendung der Frostschutzmittel kann dem umgebenden Gebirge trotz einer betriebsbedingten Abkühlung genügend thermische Energie entnommen werden. Zwar sinkt die Effizienz der Wärmepumpen aufgrund der größeren Differenz zwischen Vorlauftemperatur und Nutztemperaturniveau für die Gebäudeheizung, jedoch können so die Spitzenlasten abgedeckt werden, ohne zusätzliche Investitionskosten bzw. den zeitweiligen Verzicht auf geothermische Energie [Wenzel 2012].

Die VDI-Richtlinie 4640-2 [2001] lässt für eine optimierte Auslegung der EWS Wärmeträgerflüssigkeitstemperaturen zu, welche im Wochenmittel  $\pm 11$  K von der ungestörten Bodentemperatur abweichen dürfen. Für die Abdeckung von Spitzenlasten sind Temperaturdifferenzen von  $\pm 17$  K zur ungestörten Bodentemperatur zulässig. Damit ist ein Absinken der Rücklauftemperaturen unter 0 °C möglich. Die minimalen Rücklauftemperaturen werden in anderen Regelwerken oder Leitfäden teilweise strikter

begrenzt, wie in der Schweiz oder im Leitfaden Baden-Württembergs auf eine Minimaltemperatur von  $-3\text{ °C}$  [SIA 384-6 2010, UMBW 2012].

In Abbildung 4 ist beispielhaft die Temperaturoaufzeichnung der Vor- und Rücklauftemperaturen einer EWS dargestellt. Hierbei wurde die Temperatur an der Wärmepumpe jeweils um 12:00 Uhr gemessen. Die Sonde ist 80 Meter tief und ist als Doppel-U-Rohr-Sonde mit einem Sondenaußendurchmesser 32 mm ausgeführt. Dies entspricht den Abmessungen einer typischen EWS in Deutschland [DGG & DGGT 2014].

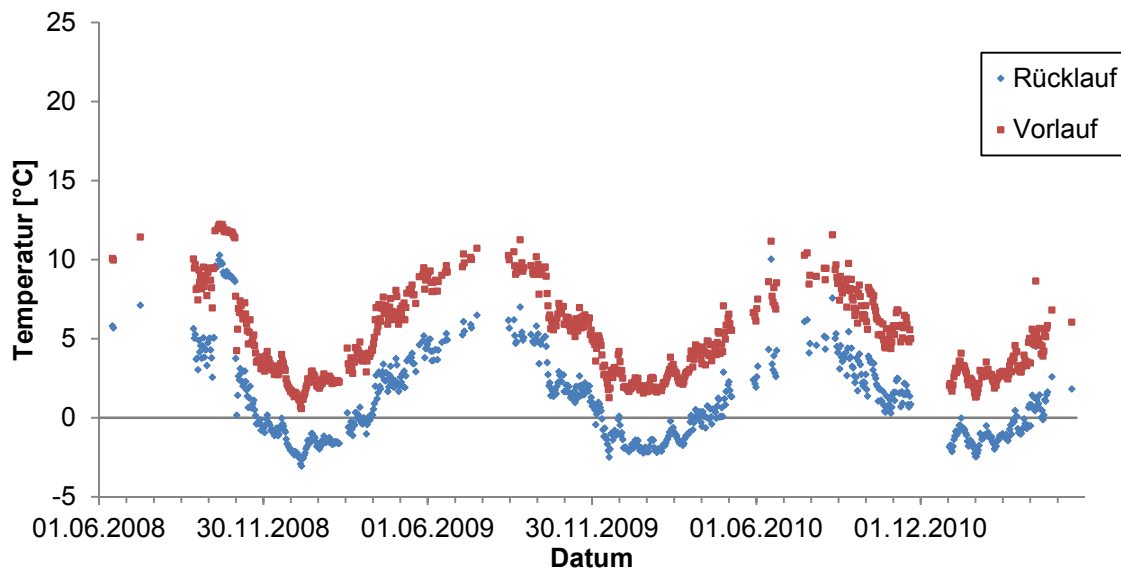


Abbildung 4: *Temperaturoaufzeichnung der Vor- und Rücklauftemperaturen einer Erdwärmesonde<sup>1</sup> (80m Tiefe, Doppel-U, Außendurchmesser 32 mm); Messzeitpunkt täglich um 12:00 Uhr)*

Aus der obigen Abbildung ist zu erkennen, dass es bei der vorgestellten Anlage regelmäßig zu Wärmeträgerflüssigkeitstemperaturen im negativen Celsiusbereich kommt. Dabei gilt es zu beachten, dass Wärmepumpen zyklisch betrieben werden, so dass es immer zu einem kurzzeitigen Absinken der Temperaturen kommt. Gängige Arbeitszeiten von erdgekoppelten Wärmepumpen sind 1800 Betriebsstunden pro Jahr für den Heizbetrieb und 2400 Betriebsstunden pro Jahr für Heizbetrieb und Warmwasserbereitung [VDI 4640-2 2001]. Bei diesem zyklischen Betrieb kann es zu einem Absinken der Temperatur im Nahfeld der EWS kommen.

Abbildung 5 zeigt die Temperaturdaten einer anderen EWS-Anlage über 24 Stunden. Darin sind die an der Wärmepumpe gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen

<sup>1</sup> Bereitstellung und Genehmigung der Daten durch das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Division Thermal Systems and Buildings, Freiburg, 30.06.2011

aufgezeichnet, sowie die Außen-, Brauchwasser- und Heizungsvorlauftemperaturen ersichtlich.

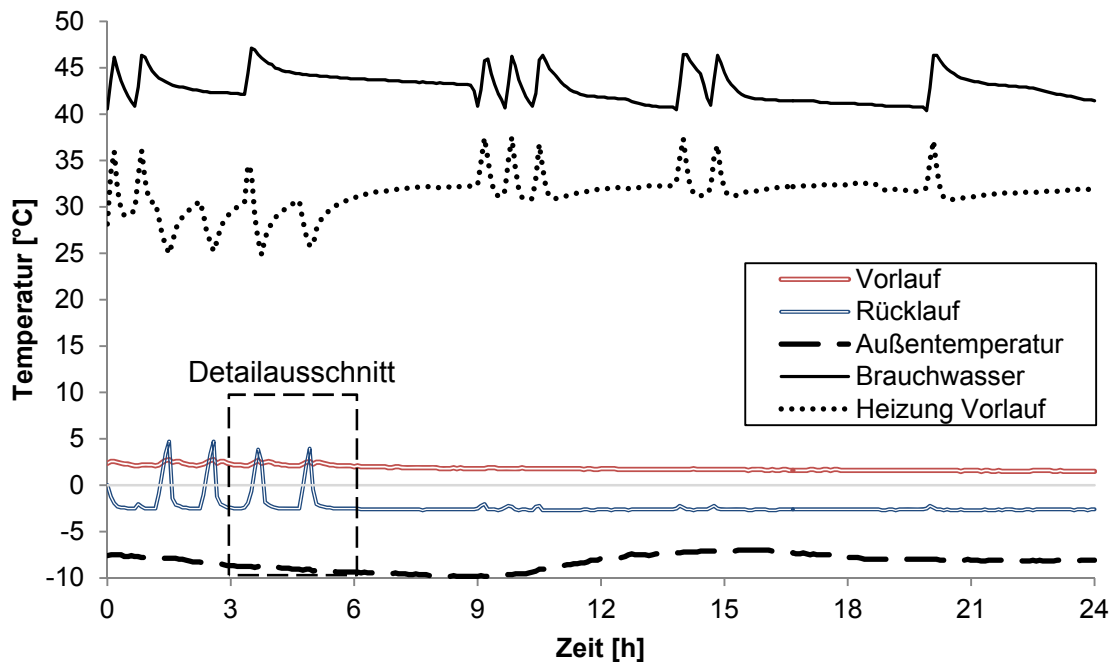


Abbildung 5: *Temperaturaufzeichnung einer EWS-Anlage<sup>2</sup>. Datum: 25.01.2014. Messintervall: 5 min. Detailausschnitt siehe Abbildung 6. (Datenbereitstellung und Genehmigung durch Gerhard Beyer)*

Bedingt durch die niedrigen Außentemperaturen und dem Bedarf an Heiz- und Brauchwasserenergie, wird die Anlage über annähernd 24 Stunden mit Rücklauftemperaturen unter 0 °C betrieben. Es wird genügend thermische Energie von der Wärmeträgerflüssigkeit aufgenommen, so dass diese mit Temperaturen über 0 °C wieder in die Wärmepumpe eintritt. Die mittlere Fluidtemperatur ist im Bereich des Gefrierpunkts von Wasser. Die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf beträgt ca. 4 K. Die Abbildung 6 zeigt einen Detailausschnitt des obigen Temperaturmonitorings über drei Stunden.

<sup>2</sup> Langzeitmonitoring einer EWS-Anlage. 3 x 100 m Doppel-U-Sonden 32 mm Außendurchmesser, Sondenabstand 10 m, Wärmepumpe mit 17 kW Leistung, Thermisch verbesserter Hinterfüllbaustoff. Messpunkte an der Wärmepumpe bzw. Heizung und Außenwand (Westen).

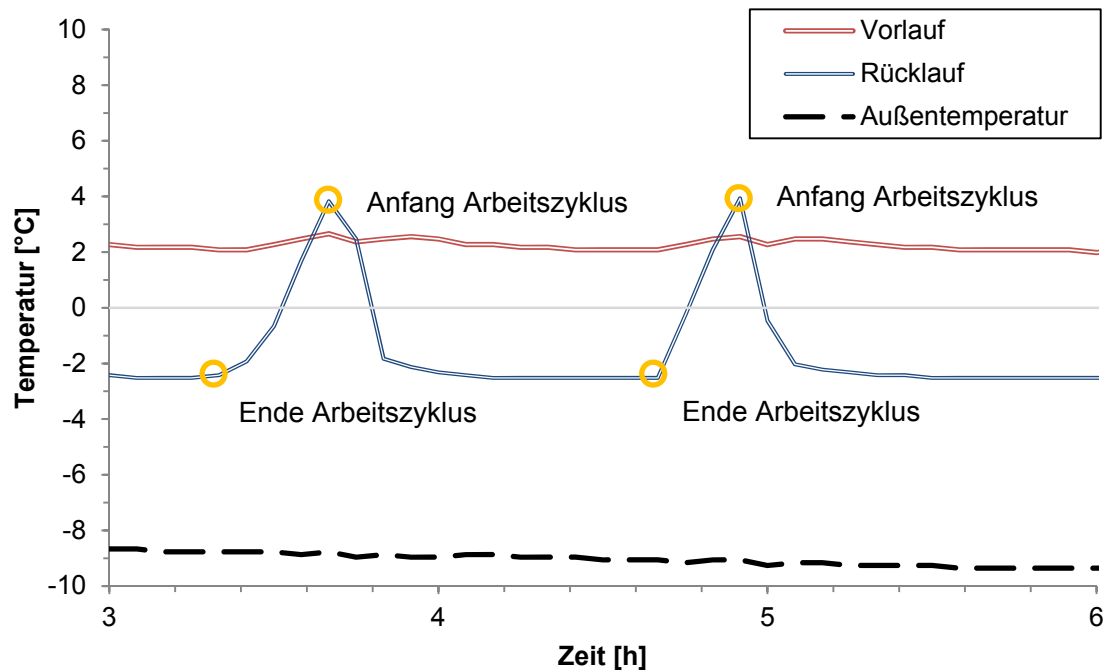


Abbildung 6: Detailausschnitt der Temperaturaufzeichnung (Abbildung 5).

Durch häufige und längere Intervalle mit negativen Rücklauftemperaturen kann es zum Einfrieren des die Sonden umgebenden Hinterfüllmaterials kommen. Dies bestätigen Schadensberichte [Bassetti et al. 2006] und numerische Simulationen [Kübert et al. 2014]. Die Eindringtiefe einer Frostfront ist dabei variabel und stark unterschiedlich. Auch ein Einfrieren des umgebenden Gebirges kann ggf. nicht ausgeschlossen werden, bedingt jedoch einen sehr großen Wärmeentzug über einen längeren Zeitraum, sowie bestimmte Ortslagen der Sondenrohre im Bohrloch.

Die Auslegung von EWS-Systemen wird häufig über Softwareanwendungen wie Earth Energy Designer (EED), EWS, *Geo-Hand<sup>light</sup>*, *PILESIM* oder *ModEW* durchgeführt [Hellström et al. 1997, Stober & Bucher, 2012]. Über die Programme können Abschätzungen getroffen werden, ob der Wärmeentzug der Anlagen und der Energiehaushalt im Boden über den Betriebszeitraum ausgeglichen sind. Dabei wird häufig als Bemessungskriterium angesetzt, dass die mittlere Fluidtemperatur nach 25 Betriebsjahren in der Grundlast nicht unter 0° C fallen darf. Detaillierte Beschreibungen können den Publikationen der Entwickler entnommen werden.

Die Fluidtemperaturen im negativen Celsiusbereich können nachteilige Auswirkungen auf die Funktionseigenschaften der Hinterfüllung haben.



## **2.2 Frost-Tau-Wechsel-Ereignisse bei Erdwärmesonden**

### **2.2.1 Auswirkungen auf die Hinterfüllung**

Wenn es in der Hinterfüllung zu einem Absinken der Temperatur unter den Gefrierpunkt des Porenwassers kommt, ändert dieses seinen Aggregatzustand. Diese FTW haben Einfluss auf die Gefügestruktur der Hinterfüllung [Müller 2004]. Allgemein ist der Lastfall des Einfrierens und Wiederauftauens von Bauteilen kritisch. So wurden die FTW-Einflüsse auf unterschiedlichste technische Bauten untersucht. Dazu gehören Bettungen im Straßenbau, Asphalttragschichten, Abdeckungen von Deponien, Betonfundamente und Natursteinpflaster, um nur einige zu nennen. Für viele dieser Bauwerke oder Materialien gibt es technische Regeln für die Prüfung des FTW-Einflusses auf die Funktionseigenschaften. Ein genormtes Prüfverfahren für Hinterfüllmaterialien von Erdwärmesonden gibt es nicht [Anbergen et al. 2014a].

Bei dem Phasenwechsel von Wasser zu Eis kommt es zu einer Volumenzunahme aufgrund der unterschiedlichen Dichten. Diese beträgt circa neun Prozent. Im wassergesättigten Zustand kommt es folglich zu einem mechanischen Druck auf das Porengefüge [Jessberger & Jagow-Klaß 1996]. Dieser Eisdruck belastet das Material auf Zug [Coussy 2005]. Wenn der Eisdruck die Zugfestigkeit des Gefüges übersteigt, kommt es zum Reißen der Struktur. Die Mechanismen der Eislinnenbildung werden im Kap. 2.3 näher beschrieben.

Je nachdem wie die Sondenrohre in einer EWS angeordnet sind, stellt sich während des Wärmeentzuges ein unterschiedliches Temperaturprofil ein. Für eine erste Abschätzung, wie sich die Temperaturen ausbreiten, wurde ein Modell mit FEFLOW erstellt. FEFLOW ist eine Simulationssoftware für die Modellierung von hydraulischen und thermischen Prozessen in porösen Medien. Es wurde ein 2D-Modell einer hinterfüllten EWS mit einer Doppel-U-Sonde (32 mm · 2,9 mm) erstellt. Der Ringraum hat einen Durchmesser von 152 mm, wie nach SLULG [2011] empfohlen. Für die Rücklauftemperatur wurde ein Wert von -3 °C angesetzt, die Vorlauftemperatur wurde mit 0 °C definiert. Die Ausgangstemperatur wurde zur Simulation eines fortschreitenden Wärmeentzuges auf 4 °C gesetzt. Die Simulation wurde für 24 Stunden Vollast durchgeführt. Die eingegebenen Materialkennwerte sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Materialkennwerte für die Simulation der Temperatursausbreitung in einer EWS.

Material	Porosität	Wärmeleitfähigkeit	Vol. Wärmekapazität
	[-]	[J s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
Sondenrohr	$1 \cdot 10^{-6}$	0,40	1,900
Hinterfüllmaterial	0.60	2,00	4,560
Wärmeträgerfluid	-	0,6	3,318
Boden	0,3	2,4	2,000
Grundwasser	-	0,59	4,186

Für das umgebende Lockergestein wurden die Werte eines Geschiebemergels nach VDI 4640-1 [2010] gewählt. Es wurde kein Grundwasserstrom angesetzt. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 7 dargestellt.

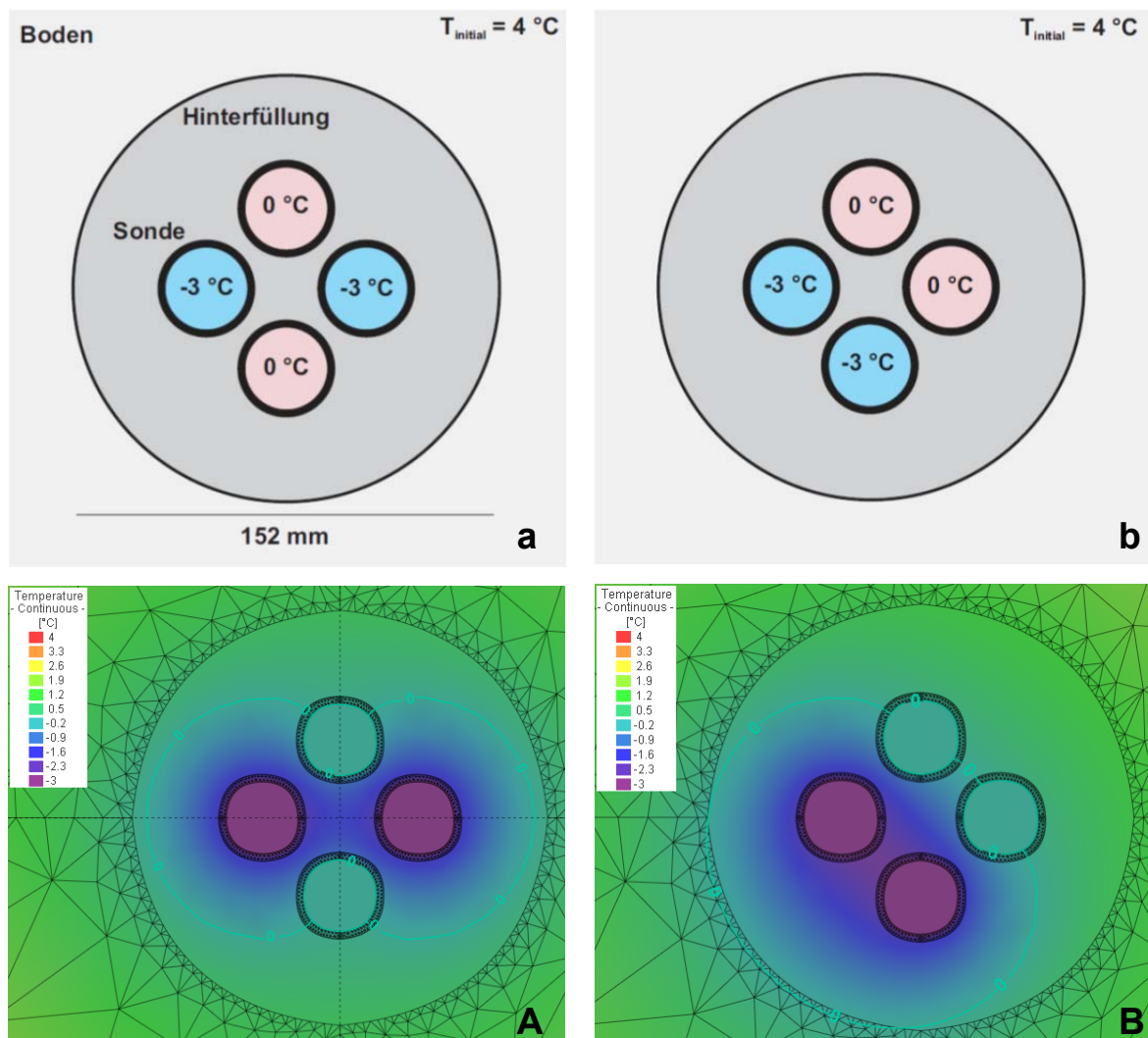


Abbildung 7: Temperaturprofile von Erdwärmesonden mit unterschiedlichen Sondenanordnungen. Schematische Darstellung (a und b) und FEFLOW Simulation nach 24 h (A und B).

Es ist ersichtlich, dass die Lage der Sondenrohre bei der gewählten Konfiguration maßgeblichen Einfluss auf das Temperaturprofil in der Hinterfüllung hat. Eine derartige Variabilität der Sondenrohlage ist wahrscheinlich [Riegger 2010]. Über die Tiefe einer EWS verändert sich die Sondenrohlage. Ebenso werden i.A. Böden unterschiedlicher thermischer Materialkennwerte angetroffen und die Wärmeträgerfluidtemperaturen variieren. Dies führt zu sich ständig ändernden Temperaturverteilungen in der Hinterfüllung und damit verbunden zu Spannungskonzentrationen in der Hinterfüllung. Die Temperaturprofile ähneln sich in dem Punkt, dass die Sondenrohre stets die Frosteintragsquelle (Wärmesenke) sind. Daher bewegt sich bei der Durchfrostung die Frostfront von der Sonde in die Hinterfüllung.

Bei der Simulation gilt es zu beachten, dass FEFLOW nicht für die Simulation von Phasenwechselvorgängen ausgelegt ist. So werden die physikalischen Prozesse in der obigen Modellrechnung nur zum Teil abgebildet. Für die vollständige Abbildung der thermischen Einflüsse des Phasenwechsels wird in Kap. 6 ein Plug-In vorgestellt. Es sind jedoch die grundsätzlichen Einflüsse der Sondenlage auf die Temperaturprofile in EWS erkennbar. Lediglich die Eindringungstiefen der Frostfront variieren.

Für die Bewertung der Auswirkungen von FTW-Ereignissen auf die Hinterfüllung ist es wichtig die Richtung der Durchfrostung zu beachten. Diese ist für die Interpretation von Rissbildern und Schadensszenarien fundamental. In den vergangenen Jahren ist es aufgrund von FTW zu diversen Schadensfällen gekommen.

### **2.2.2 Schadensfälle durch Frost-Tau-Wechsel**

Im Laufe der letzten Jahre sind diverse Schadensfälle von Erdwärmesonden aufgrund von Frost-Tau-Wechselbelastungen bekannt geworden. Die Gründe für die Durchfrostungserscheinungen und die Schadensszenarien sind mannigfaltig. Bassetti et al. [2006], Rohner & Rybach [2001] und der PK Geothermie [2011] geben einen Überblick über einige Schadensfälle. Einige solcher Schadensfälle wurden und werden vor Gericht behandelt.

Bei Schadensfällen aufgrund von Frost-Tau-Wechselereignissen gilt es zu differenzieren zwischen kurzzeitigen geplanten und unplanmäßigen FTW. Wie unter 2.1.5 beschrieben, können EWS dahingehend optimiert werden, dass die minimalen Fluidtemperaturen sich über die Betriebsjahre asymptotisch einem Grenzwert nähern und sich ein ausgeglichener Wärmehaushalt im Bereich der EWS einstellt, so dass nur so viel thermische Energie entzogen wird, wie auch nachfließt.

Die dabei auftretenden kurzzeitigen Spitzenlasttemperaturen im negativen Celsiusbereich einer fachgerecht ausgelegten Anlage, verursachen i.d.R. keine Frost-Tau-Ereignisse im gesamten Hinterfüllkörper. Bei dem Betrieb mit negativen Fluidtemperaturen werden binnen weniger Stunden negative Celsiustemperaturen in der Hinterfüllung im Nahfeld der Sonde erreicht [Kübert et al. 2014]. Gründe für ein weiteres Absinken der Fluidtemperaturen und einem unausgeglichenen Wärmehaushalt sind nachfolgend aufgeführt:

- hydraulisch ungleichmäßige Nutzung von EWS in einem Sondenfeld
- mangelhaft entlüftete Anlage
- unsachgemäßer Betrieb der Anlage
- konkurrierende Nutzung der Erdwärme durch die Nachbarschaft
- Umnutzung des Gebäudes bzw. geänderter Energiebedarf
- Anlagendefekt oder –ausfälle
- geänderte geologische Randbedingungen (z.B. Grundwasserhaltung/ -absenkung)

[DGG & DGGT 2014]

Neben den genannten Gründen für eine Überlastung der Anlage, sind unsachgemäße Auslegungen von Anlagen und Unterdimensionierungen die Ursachen für FTW. Bei einem übermäßigen Wärmeentzug kann es zu einem äußerlichen Einfrieren der Verteilerleitungen (Abbildung 8), sowie den hier thematisierten Frost-Tau-Ereignissen in der Hinterfüllung der Sonde kommen.



*Abbildung 8: Frost-Tau-Wechsel-Einfluss: Eingefrorene Verteilerleitung (A, Bassetti et al. 2006), vereister Verteilerschacht einer Erdwärmesondenanlage (B, Dittrich 2013) und Setzungsschäden einer Einfahrt über EWS (C mit Estrichauffüllung und D mit Kiesauffüllung, mit freundlicher Genehmigung des Geotechnischen Umweltbüros Lehr).*

Die Konsequenz derartiger FTW waren neben den hohen Energiekosten aufgrund der mangelhaften Funktion des Systems, teilweise starke frostbedingte Hebungen und Setzungen [PK Geothermie 2011]. Dabei ist davon auszugehen, dass es eine erhebliche Dunkelziffer an Schadenfällen gibt und das Schadensausmaß, z.B. bei vertikalem Schadstoffeintritt in das Grundwasser, nur teilweise erfasst wird.

Die zuständigen Wasserbehörden haben darauf, mangels verbindlicher technischer Vorschriften, mit unterschiedlichen Forderungen nach Hinterfüllmaterialien reagiert, die einen ausreichenden Widerstand gegen zyklische Frost-Tau-Belastungen aufweisen.

### 2.2.3 Forderung der Widerstandsfähigkeit gegen zyklische Frost-Tau-Belastungen

Bereits in der VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 [2001] wird auf eine mögliche Frostbelastung der Hinterfüllmaterialien hingewiesen. Ebenso wird auch die Widerstandsfähigkeit dieser Materialien gegen FTW empfohlen, ohne jedoch ein geeignetes Messverfahren zu spezifizieren. Die Thematik wurde bereits in diversen Veröffentlichungen diskutiert [u.a. Müller 2004, Hermann 2007, Sass 2010, Anbergen et al. 2011a] und Untersuchungen durchgeführt [u.a. Hermann 2007, Niederbrucker & Steinbacher 2008, Albrecht & Frank 2010, Anbergen et al. 2011b, 2014a, Kuckelkorn & Reuß 2013].

Der derzeitige Stand (2014) zur Genehmigungssituation in Deutschland ist in folgender Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Übersicht über die Standpunkte der Bundesländer zur Frost-Tau-Wechsel Thematik

Bundesland	Forderung nach FTW-Beständigen Hinterfüllbaustoff	Spezifizierung wie die FTW-Beständigkeit geprüft werden kann	Erlaubnis des Betriebs mit Fluidtemperaturen unter 0 °C
Baden-Württemberg	ja	nein	ja
Bayern	ja	nein	ja
Berlin	ja	ja (DIN 52104)	ja
Brandenburg	ja	nein	k.A.
Bremen	ja	nein	ja
Hamburg	ja	ja	ja
Hessen	ja	nein	ja
Mecklenburg-Vorpommern	ja	nein	ja
Niedersachsen	ja	nein	ja
Nordrhein-Westfalen	k.A.	nein	k.A.
Rheinland-Pfalz	k.A.	nein	k.A.
Saarland	k.A.	nein	k.A.
Sachsen	ja	nein	ja
Sachsen-Anhalt	ja	nein	ja
Schleswig-Holstein	ja	nein	ja
Thüringen	ja	nein	ja

Dreizehn der sechzehn Bundesländer fordern in ihren Leitfäden zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie die *(Frost-) Beständigkeit* der Hinterfüllmaterialien. Eine Definition, was eine Frostbeständigkeit ist und wie diese nachzuweisen ist, bleibt meist aus. Lediglich Berlin und Hamburg nennen Prüfverfahren, welche zugelassen sind, um



diese Materialeigenschaft zu überprüfen. Dabei bezieht sich Berlin auf ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Einflusses von Frost-Tau (salz)-Angriffen auf Naturstein [DIN 52104 1982, SSU 2012]. Dieses Verfahren wurde in bisherigen Betrachtungen der FTW-Prüfung von Hinterfüllbaustoffen häufig zugezogen und wird im folgenden Kap. 2.2.4 diskutiert. Die Freie und Hansestadt Hamburg fordert eine Prüfung nach dem hier vorgestellten Verfahren [Anbergen et al. 2013a, BSU 2014c, DGG & DGGT 2014].

Baden-Württemberg fordert eine FTW-Prüfung der eingesetzten Hinterfüllmaterialien mit Wasserkontakt, spezifiziert diese jedoch nicht weiter. In neun Bundesländern sind explizit die Empfehlungen der VDI 4640-2 [2001], auch in Bezug auf die Fluidtemperaturen, zugelassen. In anderen wird teilweise der Betrieb mit Fluidtemperaturen im negativen Celsiusbereich untersagt, was die Wirtschaftlichkeit von oberflächennahen Geothermieranlagen massiv senken kann [Wenzel 2012, Mands 2012].

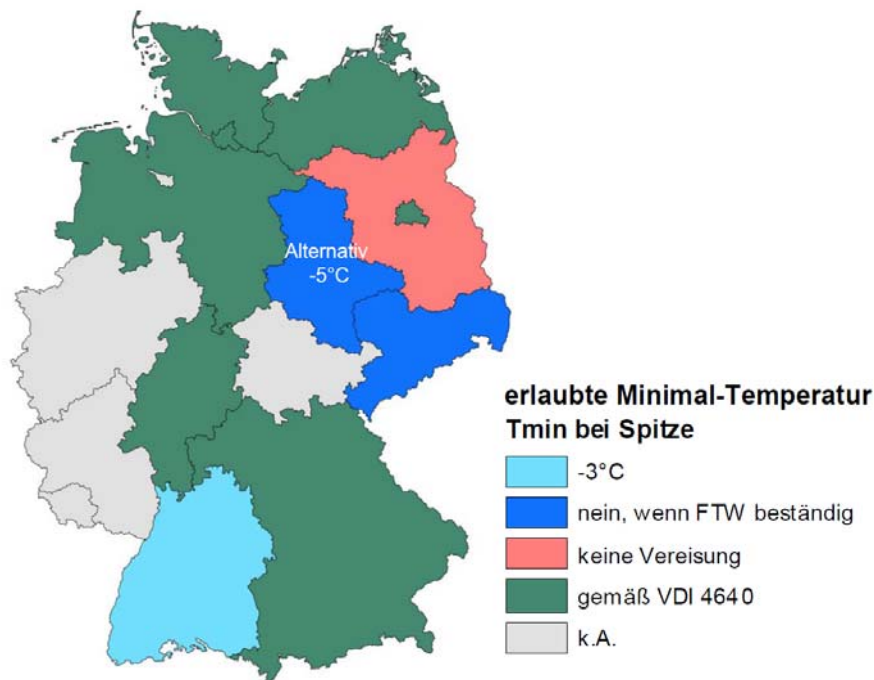


Abbildung 9: Übersicht der zugelassenen minimalen Betriebstemperaturen von EWS in Deutschland [Dittrich et al. 2014]

Ein weiterer Aspekt bzgl. der Forderung nach frostbeständigen Hinterfüllungen ist eine mögliche Abnahme der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der thermischen Lastzyklen beim Betrieb einer EWS-Anlage [Allan & Philippacopoulos 2000]. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die Erlaubnis von Fluidtemperaturen unter 0 °C sinnvoll, wenn es zu keiner Abnahme der Wärmeleitfähigkeit käme. Eine Strukturveränderung des Hinterfüllmaterials, z.B. durch konzentrische Rissstrukturen, oder Ablösungen des Hinterfüllmaterials von den

Sondenrohren, kann den effektiven Wärmestrom jedoch stark beeinflussen. Dies wurde durch die Untersuchungen von Niederbrucker [2010] bestätigt.

„Die Schädigung durch oftmaligen Frost-Tauwechsel verschlechtert neben der Abdichtungsfunktion auch die Wirkeffizienz der gesamten Anlage“

[Niederbrucker 2010, S:°104]

Dies hätte Auswirkungen auf die Entzugsleistung der Anlage und würde die Wahrscheinlichkeit und Frequenz tiefer Fluidtemperaturen erhöhen. Somit wäre bei frostempfindlichen Hinterfüllmaterialien ein progressives Schadenspotenzial gegeben. Daher hat sich die Forderung nach frostwiderstandsfähigen Hinterfüllmaterialien nicht nur in Deutschland weitestgehend durchgesetzt, sondern auch in anderen Ländern wie z.B. Österreich [Niederbrucker & Steinbacher 2008] oder Großbritannien [Environment Agency 2011]. Weiterhin werden grundsätzlich Hinterfüllbaustoffe mit einem geringen Schwindverhalten und einer hohen Wärmeleitfähigkeit empfohlen, da diese eine geringere Schadenswahrscheinlichkeit haben, als z.B. reine Zementsuspensionen [Berndt & Philippacopoulos 2008, Niederbrucker 2010, DGG & DGGT 2014].

#### **2.2.4 Bisherige Untersuchungen von Hinterfüllbaustoffen**

In den vergangenen Jahren wurden diverse Studien zu der hydraulischen Integrität von Hinterfüllmaterialien durchgeführt. Dabei wurden nicht nur Hinterfüllmaterialien für EWS untersucht, sondern ebenfalls für Brunnenbauwerke. Erdwärmesonden und Brunnen ähneln sich grundsätzlich vom Herstellungsprozess her. Beide Bauwerkstypen werden mit Hinterfüllsuspensionen hergestellt, welche von den Grundkomponenten (meist Zement, Ton und Füllmaterial) ähnlich sind. So wurden für die Hinterfüllung von Erdwärmesonden anfangs Zementsuspensionen verwendet, wie sie auch im Brunnenbau verwandt wurden [Allan & Philippacopoulos 1998a]. Aufgrund der Gemeinsamkeiten der Bauwerkstypen wird in dieser Arbeit auf Untersuchungen zur Systemdurchlässigkeit von Brunnen mit Bezug genommen.

In den 1990er Jahren wurden am Brookhaven National Laboratory USA Eignungs- und Optimierungsuntersuchungen von Hinterfüllbaustoffen für EWS durchgeführt. Dabei wurden die zyklischen thermischen Belastungen von Erdwärmesonden in Verbindung mit Wärmepumpen untersucht [Allan & Philippacopoulos, 1998a]. Diese Untersuchungen beschränken sich jedoch auf Temperierungen bis + 1 °C und nicht bis in das Frostmilieu. Bei den Untersuchungen wurden erste Systemdurchlässigkeitsversuche unter Berücksichtigung der Kontaktfläche zwischen Hinterfüllbaustoff und Sondenmaterial durchgeführt.



Die Systemdurchlässigkeit ist definiert als die tatsächliche Wasserdurchlässigkeit eines Prüfvolumens unter Einbeziehung der anisotropen Fließwiderstände. Im Gegensatz zur Materialdurchlässigkeit werden hier präferierte Wasserwegsamkeiten wie die Kontaktfläche zu Sondenrohren miteinbezogen. (Analogie zu Gebirgs- und Gesteinspermeabilität).

Als Ergebnis der Untersuchung wurde ein thermisch verbesserter Hinterfüllbaustoff auf Zement- und Quarzbasis beschrieben, welcher neben einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit, auch verbesserte abdichtende Eigenschaften aufwies. Etwa zur gleichen Zeit wurden in Deutschland ebenfalls Untersuchungen zur thermischen Optimierung von Hinterfüllbaustoffen durchgeführt und folglich auch thermisch verbesserte Hinterfüllmaterialien entwickelt [Ebert et al. 2000].

Anfang der 2000er Jahre wurden in Deutschland erstmals Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses von Frost-Tau-Wechseln auf Hinterfüllbaustoffe für EWS durchgeführt [Müller 2004, 2009a]. Dabei kamen genormte Prüfverfahren für andere Baustoffe wie Betone und Natursteine zur Anwendung, da es bis dato kein genormtes Prüfverfahren für Hinterfüllbaustoffe gab und gibt [Anbergen et al. 2014a]. Bei diesen Untersuchungen wurden Prüfkörper aus Hinterfüllmaterial hergestellt, für definierte Zeiten gelagert und anschließend in Klimakammern von außen nach innen durchfrostet. Dabei wurde die Durchfrostung entweder unter Verdunstungsschutz [Niederbrucker & Steinbacher 2008] oder mit einseitiger Wasserzufuhr [Müller 2009a] durchgeführt, wie es auch in den Leitlinien zur Qualitätssicherung in Baden-Württemberg gefordert wird [UMBW 2012]. Bei uneingeschränkter Wasserzufuhr während des Durchfrostungsprozesses, kann es zu größeren Frosthebungen kommen als bei beschränkter Wasserzufuhr [Ono 2002]. Daher stellen die Untersuchungen von Müller [2009a] den kritischeren Lastfall da gegenüber denen von Niederbrucker & Steinbacher [2008].

Nach den Frost-Tau-Zyklen wurden visuelle Begutachtungen, Wägungen oder Wasserdurchlässigkeitsversuche durchgeführt. Als Normen sind hier besonders die DIN 52104-2 [1982], die ÖNORM B 3303 [2002] und die DIN 1367-1 [2007] zu nennen, welche sich auf Naturstein, Beton bzw. Gesteinskörnungen und deren Frostprüfungen beziehen. Bedingt durch das Eislinnenwachstum wurden einige der Prüfkörper wurden in Ihrer Struktur so stark gestört, dass die deutliche Risse oder Abplatzungen aufwiesen.

Ein Versuchsstand der Technischen Hochschule Karlsruhe (heute Karlsruher Institut für Technologie – KIT) hat über den *CIF-Test* (Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw) die frostbedingten Risse in Prüfkörpern detektiert und darüber Aussagen

zur Integrität der Prüfkörper abgeleitet [Herrmann 2007]. Nach Hermann & Czurda [2007] beträgt der frostbedingte Durchlässigkeitsanstieg von Hinterfüllbaustoffen circa eine Zehnerpotenz. Für den Test wurden Prüfkörper in einer Kunststoffmanschette in einem Wasserbad FTW ausgesetzt. Nach den FTW wurden über Ultraschallmessungen die entstandenen Rissstrukturen detektiert. Es wurde beobachtet, dass manche Hinterfüllmaterialien während der Durchfrostung eine starke nicht reversible Hebung erfuhren. Eine solche ungehinderte Volumenveränderung der Hinterfüllung ist *in-situ* jedoch nicht möglich.

Bei den oben beschriebenen Untersuchungen handelt es sich grundsätzlich um Versuchsmethoden, welche nicht die hydraulische Durchlässigkeit des Materials prüfen. In einigen Fällen wurde aus diesem Grund eine Wasserdurchlässigkeitsprüfung gemäß DIN 18130-1 [1998] konsekutiv durchgeführt. Jedoch ist dies mit einem Arbeitsschritt verbunden, welcher unausweichlich eine Veränderung der Spannungszustände im Prüfkörper bewirkt, besonders die der radialen Spannungen. Die Prüfkörper werden in Wasserdurchlässigkeitsmesszellen ein- und ausgebaut, wobei ein paralleler Versatz der eventuell vorhandenen Rissstrukturen wahrscheinlich ist. Die Folge sind präferierte Wasserwegsamkeiten, welche durch Arbeitsprozesse entstehen, wie sie *in-situ* nicht auftreten. Die Ableitung von Aussagen über das Materialverhalten der Hinterfüllung einer EWS, basierend auf der hydraulischen Durchlässigkeit eines Materials nach derartiger Frostprüfung, ist daher als kritisch zu bewerten [Albrecht & Frank 2010, Anbergen et al. 2014a].

Bei der Betrachtung der Durchlässigkeit von hinterfüllten Bauwerken wie Brunnen oder Erdwärmesonden, muss das System beachtet werden [Baumann et al. 2003, Kuckelkorn & Reuß 2012, Anbergen et al. 2011a]. Dabei bilden die Kontaktflächen der unterschiedlichen Materialien, wie Sonde, Hinterfüllbaustoff und Boden, potenzielle präferierte Wasserwegsamkeiten. Bei der Kontaktfläche zwischen Hinterfüllmaterial und Bohrlochwand kann von einer relativ guten Verzahnung der Materialien ausgegangen werden, zumal die fließfähige Suspension in den Randbereich des anstehenden Lockergesteins eindringen kann und sich eine Skinzone ausbildet [DGG & DGGT 2014]. Einschlägige Empfehlungen zur Durchführung von Wasserdurchlässigkeitsversuchen bestätigen die abdichtenden Auswirkungen von radial umgebenden feinkörnigen Bodenschichten um Prüfkörper [von Soos 1996]. Im Kontrast dazu muss bei der Kontaktfläche des hydrophoben Polyethylens und des hydrophilen Hinterfüllmaterials von einem nicht kraftschlüssigen Verbund ausgegangen werden. Dies bestätigen Untersuchungen von Baumann et al. [2003] an Brunnenbauwerken. Baumann et al. haben in Feldversuchen die Wasserwegsamkeiten entlang von Polyvinylchlorid (PVC)

Rohren untersucht. Da PVC wie auch PE ein hydrophober Werkstoff ist [Asadinezhad et al. 2012], können aus den Ergebnissen der Feldversuche Ableitungen auf das Systemverhalten von EWS gefolgert werden.

„Aufgrund einer mangelhaften Anbindung der Verpressmasse an des glatte PVC-Rohr ergibt sich in diesem Bereich [der Kontaktfläche zwischen Rohr und Hinterfüllmaterial, d. Verf.] eine ideale Wegsamkeit für Flüssigkeiten, die sich schon bei verhältnismäßig niedrigen angewandten Überlagerungsdrücken deutlich zeigte.“

[Baumann et al. 2003, S. 20]

Die Beobachtungen von Baumann et al. bestätigen die Notwendigkeit der Messung der Systemdurchlässigkeit für eine valide Bewertung der hydraulischen Integrität von EWS.

Müller hat 2009 als Ergebnis der Untersuchungen der Hochschule Ostwestfalen-Lippe publiziert, dass bei den bisherigen Untersuchungen die Durchfrostungsrichtung unzureichend berücksichtigt wurde, ebenso wie Einspannung der Prüfkörper. Er empfahl weiterhin die Messung der Wasserdurchlässigkeit vor und nach Frost-Tau-Beanspruchung. Dies ergaben ebenfalls die Untersuchungen von Albrecht & Frank [2010]. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde das hier vorgestellte Forschungsvorhaben aufgenommen und ein Prüfverfahren entwickelt [Anbergen et al. 2014a].

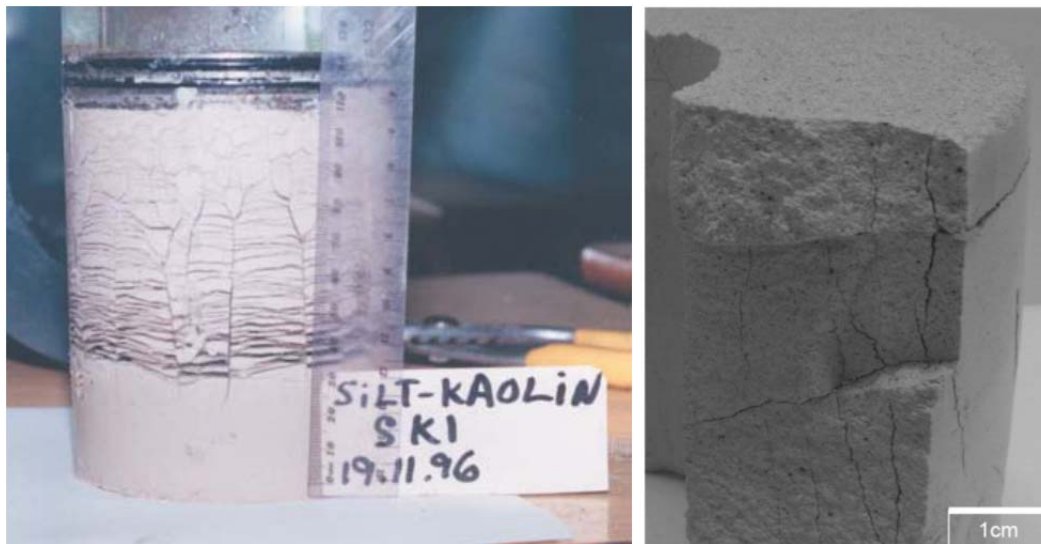
Die bisherige Orientierung an Prüfnormen aus dem Beton- und Straßenbau hat zu einer Entwicklung der Hinterfüllbaustoff hin zu druckfesteren und betonähnlicheren Baustoffen geführt, da so die angewendeten Prüfungen bestanden werden konnten. Daraus resultierten unter anderem Fehleinschätzungen bezüglich der Frostbeständigkeit einzelner Komponenten, wie der quellfähigen Tonanteile. Selbstheilungseigenschaften durch ein Nachquellen von Tonanteilen kann bei den genannten Prüfverfahren nicht bewertet werden bzw. wird gänzlich außer Acht gelassen. Aussagen, dass ein Ton nicht frostbeständig sei, die aus straßenbautechnischer Sicht korrekt sind, treffen für die Anwendung als Durchflusssperre nicht zwingend zu [Kraus et al. 1997, Chamberlain, 1981]. Für die hydraulische Durchlässigkeit ist die Druckfestigkeit nicht das entscheidende Maß. Viklander [1988] hat bei seinen Untersuchungen von Geschiebemergelproben, welche durch FTW belastet wurden, einen Durchlässigkeitsanstieg in der Größenordnung von einer Zehnerpotenz festgestellt. Dies entspricht den Beobachtungen von Hermann & Czurda [2007]. Demnach ist nicht zwingend von einem niedrigeren FTW-Widerstand von Hinterfüllmaterialien gegenüber derartigen Böden zu rechnen. Die Versuche simulierten jedoch nicht die Durchfrostungsrichtung wie sie Hinterfüllungen von EWS erfahren.

Die bisherigen Untersuchungen spiegeln die in-situ Verhältnisse hinterfüllter EWS nicht ausreichend wieder. Daher besteht Bedarf an einem Prüfverfahren welches den FTW-Widerstand von Hinterfüllungen für EWS einheitlich bewertet und dabei die maßgeblichen physikalischen Randbedingungen erfüllt. Parallel zu dieser Arbeit wurde ein Technikumversuch am Zentrum für Angewandte Energieforschung Bayern e.V. aufgebaut und Hinterfüllmaterialien geprüft. Die Ergebnisse des Versuchs werden in Kap. 8 diskutiert.

## **2.3 Mechanismen der Eislinsenbildung**

Der Ort und Umfang der Bildung von Eislinsen in Böden bzw. bodenähnlichen Körpern hängt von diversen Einflussfaktoren ab, wie der Durchfrostungsgeschwindigkeit und den absoluten Temperaturen, der hydraulischen Durchlässigkeit, der Korngrößenverteilung, der Porendurchmesser und der Mineralogie des porösen Mediums, der chemischen Zusammensetzung des Porenwassers sowie dem Überlagerungsdruck [u.a. Konrad & Morgenstern 1980, Jessberger & Jagow-Klaff 1996, Unold 2006, ASTM D-6035 2008, Anbergen et al. 2014a].

Konrad und Morgenstern [1980] haben in diversen Studien die Durchfrostungsmechanismen in feinkörnigen Böden untersucht. Dabei wurde besonders auf das Frosthebungsverhalten eingegangen, welches ebenfalls von Unold [2006] messtechnisch quantifiziert wurde. Zentraler Aspekt bei der Durchfrostung ist, dass es an der Stelle des Frosteintritts kaum zu einem Eislinsenwachstum kommt. Der Phasenwechsel findet dort i.d.R. schnell statt und das Wasserdargebot lässt das Wachstum von Eislinsen nicht zu. Mit zunehmender Entfernung von der Frosteintrittsstelle kann mehr Wasser durch die Struktur zur Frostfront gelangen und es steht mehr freies Wasser zur Verfügung. Folglich kann es zur Bildung lokaler Eisagglomerate (Eislinsen) kommen (Abbildung 10). Die Mächtigkeit der Eislinsen hängt dabei von der Kornverteilung des Bodens und der Mineralogie ab. So werden i.d.R. grobkörnige Böden als frostunempfindlich eingestuft, da kein kapillarer Wassertransport stattfinden kann. Zwar gefriert das Porenwasser, aber es kommt nicht zu den lokalen Eislinsenbildungsmechanismen, da der Boden ein zu geringes kapillares Steigvermögen aufweist. Bei feinkörnigen Böden ist eine kapillare Leifähigkeit vorhanden, so dass über den Gefriersog Wasser zur Frostfront transportiert werden kann [Unold 2006].



*Abbildung 10: Rissmuster nach vertikaler Durchfrostung eines Schluff-Kaolin-Gemisches nach Konrad & Lemieux [2005]. Die Durchfrostung erfolgte von oben (links). Geöffneter Prüfkörper von innen nach außen durchgefrostet, nach Trocknung. Die Durchfrostung erfolgte von links nach rechts (rechts).*

In der Abbildung 10 (links) ist das Rissmuster eines Versuches zyklischer vertikaler Durchfrostungen eines Schluff-Kaolin-Gemisches zu erkennen. Zum einen ist die beschriebene Häufung der frostbedingten Gefügeveränderungen mit zunehmendem Abstand von der Frosteintrittsstelle ersichtlich. Zum anderen kann die parallele Ausrichtung der Rissstrukturen orthogonal zur Durchfrostungsrichtung beobachtet werden. Versuche an einem Hinterfüllbaustoff (Abbildung 10, rechts) weisen die gleiche Charakteristik auf; sowohl die Häufung der Rissstrukturen, als auch die parallele Ausrichtung der Risse orthogonal zum Wärmefluss. Dies bestätigt, dass sich die Eislinsenbildungsmechanismen in feinkörnigen Böden und Hinterfüllbaustoffen grundsätzlich ähneln. Eine schematische grafische Beschreibung der Eislinsenbildung in feinkörnigen Böden wurde von Konrad & Morgenstern [1980] publiziert (Abbildung 11).

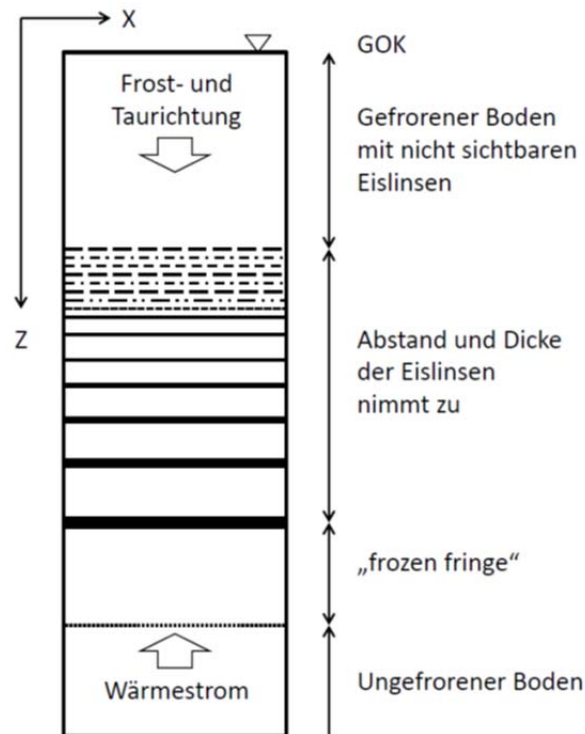


Abbildung 11: Schematische Darstellung der rhythmischen Eislinsenbildung bei vertikaler Frosteindringung in einem feinkörnigen Boden [verändert nach Konrad & Morgenstern 1980, Unold 2006]

Die schematische Darstellung des rhythmischen Eislinsenwachstums ist mit den Beobachtungen aus Abbildung 10 kohärent. Da der Ort der Eislinsenbildung von der Durchfrostungsrichtung abhängt, muss diese zwingend bei der versuchstechnischen Simulation von FTW-Ereignissen befolgt werden. In dem Fall von EWS muss die Durchfrostung vom Sondenrohr ausgehen. Die Frostfront bewegt sich von der Sonde aus in die Struktur. Als Frostfront wird der Bereich definiert, an welchem das Porenwasser von flüssiger in feste Phase übergegangen ist. Die Frostfront bewegt sich beginnend an der Temperatursenke in Richtung des Temperaturgradienten. Bei der Definition gilt es zu beachten, dass je nach vorliegendem (Boden-) Material ein definierter Anteil des Porenwassers in flüssiger Phase verbleibt. Bei Untersuchungen von Zeng et al. [2011] wurde ungefrorenes Wasser bei Temperaturen von bis zu  $-78\text{ °C}$  nachgewiesen. Da zementbasierte Hinterfüllmaterialien i.d.R. geringe Anteile an Tonmineralen aufweisen, kann von einem ähnlichen Verhalten wie bei feinkörnigen Böden ausgegangen werden. So ist davon auszugehen, dass es zu einem nahezu vollständigen Phasenwechsel wenige Kelvin unter  $0\text{ °C}$  kommt (Unold 2006, Anbergen et al. 2014b)

## 2.4 Bodenmechanik

Für die Hinterfüllung von EWS können unterschiedliche Hinterfüllmaterialien eingesetzt werden, die sich in ihren mechanischen Eigenschaften substanziell unterscheiden. Ein Ton verhält sich fundamental anders als ein zementbasierte Baustoff. So wird für die folgenden bodenmechanischen Betrachtungen der Fokus auf zementbasierte Hinterfüllmaterialien gelegt.

Die ausgehärtete Hinterfüllung bildet im idealen Fall eine lückenlose Säule über die gesamte Bohrlochlänge. Die Hinterfüllsuspension erhärtet im Bohrloch. Es ist davon auszugehen, dass die Suspension weitestgehend volumenbeständig verbleibt, wie es von der DGG & DGGT [2014] gefordert wird. Die Betrachtungen bleiben von einem anfängliches Absetzen aufgrund von Sedimentationen unberührt. Zu dem Betrachtungszeitpunkt, nach mindestens 28 Tagen, haben die meisten zementbasierten Hinterfüllmaterialien eine ausreichende Steifigkeit und Druckfestigkeit, dass von einem festen Körper ausgegangen werden kann.

Die Hinterfüllsäule wird durch den Bohrlochringraum eingespannt, wie es auch bei Pfählen der Fall ist. Für die Interaktion von Hinterfüllung und umgebenden Boden sind die grundwassergeringleitenden Schichten von gesteigertem Interesse, da hier das größte hydrogeologische Gefährdungspotenzial besteht (Abbildung 3). Diese Bereiche sind meist bindige Böden. In bindigen Böden ist davon auszugehen, dass sich im stationären Zustand direkt an der Bohrlochwand der gleiche horizontale, vertikale, als auch tangential Erddruck einstellt, wie in weiterer Entfernung. Dies wird durch Untersuchungen zum Pfahltragverhalten bei zyklischen axialen Belastungen bestätigt [Thomas & Kempfert 2011].

Die auftretenden horizontalen Relativbewegungen von der Hinterfüllsäule zum anstehenden Gebirge, und umgekehrt, sind ausschlaggebend für den Betrag des Erddruckes. Hier ist es notwendig zwischen Hinterfüllbaustoffen, die ein starkes Frosthebungsverhalten aufweisen, und frostunanfälligen Hinterfüllungen, zu unterscheiden. Für eine erste Betrachtung wird von einem weitestgehend stabilen Baustoff ausgegangen. Die horizontalen Relativbewegungen während eine FTW-Ereignisses sind grundsätzlich als klein einzustufen. Daher wird von dem Erdruhedruck  $K_0$  [Gudehus 1996, Rebstock 2005] für die Berechnungen ausgegangen. Je nachdem, ob es zu einer Volumenänderung der Hinterfüllsäule aufgrund von FTW-Erscheinungen kommt oder nicht, kommt es zu einer Relativbewegung zwischen Hinterfüllung und umgebenden

Gebirge. Dehnt sich die Hinterfüllsäule radial aus, so wird neben dem Erdruchdruck ein Anteil passiven Erddruckes aktiviert, wodurch ein höherer Dehnungswiderstand entsteht. Im Folgenden wird für ein überschlägliches Modell die Berechnung der Radialspannungen dargestellt.

Für die Berechnung der vertikalen Spannungen in geschichteten Böden gilt Gleichung (1) [DGGT 2012b].

$$\sigma_z = \sum_i^n (\gamma_{B,i} \cdot h_i) + \sum_j^m p_j \quad (1)$$

Mit

$\sigma_z$  = Vertikalspannung [kN]

$\gamma_{B,i}$  = Wichte des Bodens der jeweiligen abschnittsweisen homogenen Schicht i [kN · m<sup>-3</sup>]

$h_i$  = Mächtigkeit der jeweiligen Schicht i [m]

$p_j$  = Auflast j [kN · m<sup>-2</sup>]

Die Vertikalspannung in einem homogenen Bodenkörper ohne zusätzliche Auflast oder Kohäsion wird nach Gleichung (2) berechnet.

$$\sigma_z = \gamma_{B,k} \cdot z \quad (2)$$

Mit

$\gamma_{B,k}$  = charakteristische Wichte des Bodens [kN · m<sup>-3</sup>]

$z$  = Tiefe unter der Geländeoberkante [m]

Je nachdem welcher Wassersättigungsgrad in dem Bodenkörper vorliegt, wird die Trockenwichte, die Feuchtwichte oder die Auftriebswichte verwendet. Diese Werte können entweder durch Versuche und Berechnungen bestimmt werden, oder als Anhaltswert der Fachliteratur entnommen werden [Smolczyk 1996].

Für die Berechnung der horizontalen bzw. radialen Spannung an der Bohrlochwand, wird die Vertikalspannung mit einem Erddruckbeiwert gemäß Gleichung (3) multipliziert [DGGT 2012b].

$$\sigma_r = \sigma_z \cdot K \quad (3)$$

Mit

$\sigma_r$  = Radialspannung [kN · m<sup>-2</sup>]

$K$  = horizontaler Erddruckbeiwert [kN]



Dabei ist in bestimmten Fällen noch die Kohäsion des Bodens mit einzubeziehen, welche sich je nach Richtung der Relativbewegung unterschiedlich stark auswirkt. Außerdem ist  $K$  stark von der Richtung der Relativbewegung abhängig, da darüber bestimmt wird, zu welchem Maße der horizontale Erddruck mobilisiert wird.

Unter der Annahme, dass das Hinterfüllmaterial keine Volumenveränderung erfährt und so auch keine Relativbewegung ( $\delta = 0$ ) stattfindet, kann für den Erddruckbeiwert  $K$  der Erdruhedruckbeiwert  $K_0$  angesetzt werden.

$$\sigma_r = \sigma_z \cdot K_0 \quad (4)$$

Mit

$K_0$  = horizontaler Erdruhedruckbeiwert [kN]

Für die Berechnung von Erddrücken an Wandungen sind die Wandneigung  $\alpha$  und die Neigung der Geländeoberfläche  $\beta$  zu beachten. Ausgehend von einer vertikalen Bohrung ( $\alpha = 0$ ) und einer neigungsfreien Geländeoberfläche ( $\beta = 0$ ) kann nach *Jaky* [Triantafyllidis 2013] in der Praxis für  $K_0$  folgender Ansatz gewählt werden:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (5)$$

Mit

$\varphi$  = innerer Reibungswinkel des Bodens [°]

Nach obiger Formel kann  $K_0$  Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Bei Entlastungen und Wiederbelastungen, sowie stark bindigen Böden können Erdruhedruckbeiwerte  $K_0$  größer eins auftreten. Dabei sind, gemäß Erfahrungen aus dem Tunnelbau, Werte in einem Bereich zwischen null und drei möglich [Burbaum 2013]. Dementsprechend können die Radialspannungen über einen breiten Wertebereich schwanken. In der Abbildung 12 ist exemplarisch die Entwicklung der Radialspannungen über die Tiefe abgebildet. Der beispielhafte Bodenaufbau und die angenommenen Werte können der Abbildung entnommen werden.

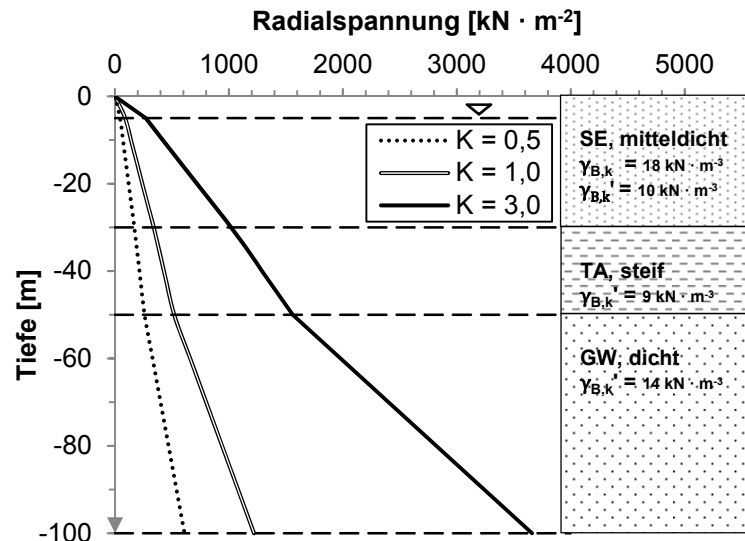


Abbildung 12: Entwicklung der Radialspannungen im Boden über die Tiefe. Angenommene Erddruckbeiwerte zwischen 0,5 und 3,0.

Während des Hinterfüllvorganges einer EWS wird i.d.R. die Bohrung über die gesamte Tiefe in einem Arbeitsgang von unten nach oben verfüllt. Das bedeutet, dass sich folglich über die Tiefe ein hydrostatischer Druck aufbaut, welcher zu einer isotropen Spannungsverteilung führt. Dabei gilt es besonders die Druckfestigkeiten der Sondenrohre zu beachten, dass eine mechanische Schädigung aufgrund des hydrostatischen Überlagerungsdruckes ausgeschlossen wird [Anbergen et al. 2013b]. Zur Verringerung des äußerlich wirkenden Überdrucks werden die Sondenrohre meist mit Wasser gefüllt. Die fließfähige Suspension erstarrt mit der Zeit und erhärtet zu einem festen Hinterfüllkörper in Abhängigkeit zu den Zementkomponenten. Ausgehend von einer weitestgehend volumenbeständigen Suspension bleiben die Spannungszustände am Rand der Hinterfüllsäule annähernd erhalten. Die Auflockerungsprozesse aufgrund der Bohrung sind besonders für die nichtbindigen Böden von Interesse und sind maßgeblich vom Bohrverfahren abhängig. In den bindigen Schichten kann häufig davon ausgegangen werden, dass sich ein Spannungszustand annähernd gleich dem Ausgangszustand des ungestörten Bodens wieder einstellt [Thomas & Kempfert 2011]. In Festgesteinen sind die ausgeführten Fragestellungen ebenfalls von nachrangigem Interesse.

Erdwärmesonden sind keine tragenden Bauteile und somit ist davon auszugehen, dass die Hinterfüllsäule der EWS nicht durch eine Auflast axial beansprucht wird. Somit ist ein isotroper Spannungszustand im Hinterfüllkörper und auch an dessen Rand wahrscheinlich. Dies entspricht einem Wert von  $K_0 = 1$ . Ein möglicher radialer Überlagerungsdruck könnte sich demnach z.B. bei einer Veränderung, in diesem Fall einer Erhöhung, der Spannungszustände in der bindigen Schicht einstellen. Gründe

hierfür könnten z.B. errichtete Bauwerke, veränderte Grundwasserverhältnisse oder Gebirgsbewegung sein.

Grundsätzlich ist an der Wandung der Hinterfüllsäule mit keinem oder einem geringfügigen radialen Überlagerungsdruck zu rechnen. Dies gilt auch bei einer Durchfrostung der Hinterfüllsäule, wenn das Hinterfüllmaterial keine Verformungen bzw. Frosthebungen erfährt. Ist dies nicht der Fall und die Hinterfüllung dehnt sich z.B. aufgrund von Eislinienwachstum radial aus ( $\delta \neq 0$ ), so kommt es zu einer Aktivierung eines passiven Erddrucks [Gudehus 1996]. Da die Aktivierung des Erddruckes verschiebungsabhängig ist und die Verschiebung wiederum von vielen Einflussfaktoren, wie u.a. dem radial anliegenden Erddruck abhängt, gibt es hierfür keine pauschale Lösung. Über Bettungsansätze sind Abschätzungen des resultierenden Erddrucks denkbar. Qualitativ lässt sich festhalten, dass wenn es zu radialen Frostdehnungen in der Hinterfüllsäule aufgrund eines erhöhten Eisdrucks kommt [Hager 1996], so wird das umliegende Gebirge verformt.

Durch zyklische FTW findet eine lokale Verdichtung des Gefüges statt [Othman & Benson 1993], welche bei dem Tauprozess in einer absoluten Auflockerung des Bodens resultiert. Dies wird häufig als Tausetzung bezeichnet [Johansson 2009]. Die Konsequenz sind Setzungen im Nahfeld der EWS, welche eine zusätzliche Last auf die EWS, analog zu einer negativen Mantelreibung an Pfählen, bewirken kann [Triantafyllidis 2007]. Dies führt zu einer axialen Belastung der EWS und ggf. zu Kraterbildungen an der Geländeoberfläche, wie es bereits häufig bei frostbeanspruchten EWS beobachtet wurde [Bassetti et al. 2006]. Derartige Setzungen können einerseits langsam stattfinden, andererseits ist ein schlagartiges Setzungsverhalten in Form eines Grundbruches möglich, wodurch eine stark dynamische Belastung induziert wird. Das Ausmaß derartiger Setzungen ist neben dem Frostverhalten des Hinterfüllmaterials, maßgeblich von den Materialeigenschaften des anstehenden Bodens abhängig.

Grundsätzlich sind die durch FTW hervorgerufenen Setzungen bei feinkörnigen Böden größer als bei grobkörnigen [Konrad & Lemieux 2005]. Dies sind i.d.R. die Bodenhorizonte, deren hydraulische Eigenschaften aus hydrogeologischer Sicht geschützt werden müssen. Der Einfluss auf den hydraulischen Fließwiderstand eines Bodens unter derartigen Belastungen ist ungeklärt.

Finden die FTW ausschließlich in der Hinterfüllung statt und ist diese widerstandsfähig, dass es zu keinen signifikanten Dehnungen kommt, sind aus bodenmechanischer Sicht keine nachteiligen Auswirkungen zu erwarten. Daher ist es von großem Interesse den Frost-Tau-Wechsel-Einfluss von auf die Hinterfüllmaterialien zu untersuchen.

## 2.5 Hydrogeologie

Im Allgemeinen stehen EWS im Grundwasserkontakt. Dabei sind die Wechselwirkungen der verwendeten Materialien der EWS mit der Grundwasserbeschaffenheit und den geologischen Verhältnissen zu beachten. Grundsätzlich ist dabei zwischen den hydrochemischen und den hydraulischen Fragestellungen zu unterscheiden.

### *Hydrochemie*

Bei Fragestellungen, ob die geforderten Funktionen der Hinterfüllung einer EWS (siehe Kap. 2.1.3) erfüllt werden, müssen eventuelle chemische Wechselwirkungen zwischen dem anstehenden Gebirge sowie dem Grundwasser und der Hinterfüllung betrachtet werden. Dies ist besonders bei aggressiven Wässern zu beachten und Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben [Zorn et al. 2014].

Die einzelnen Komponenten eines Hinterfüllmaterials reagieren zum Teil stark anfällig auf die chemische Wasserzusammensetzung. Saure Grundwässer können das basische Milieu der, i.d.R. vorhandenen, Zementkomponenten absenken. Dies kann zu Carbonatisierung führen. Bei der Carbonatisierung kommt es zu einer chemischen Umwandlung von Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat. Der Umwandlungsprozess ist je nach Modifikation (Aragonit, Calcit oder Vaterit) mit einer unterschiedlichen Volumenzunahme verbunden. Diese beläuft sich auf einen Bereich von ca. 1 bis 19 Volumenprozent [Schäffel 2009]. Dabei gilt es zu beachten, dass sich die angegebene Volumenzunahme nur auf die Umwandlungsprodukte bezieht und nicht auf die anderen Komponenten des Hinterfüllmaterials. Je nach Randbedingungen kann es dabei zu einem Quell- oder Schwindvorgang kommen, welcher maßgeblich vom relativen Feuchtgleichgewicht zur Umgebung abhängt. Da die Hinterfüllung von Boden umgeben ist, ist ein Feuchtigkeitsverlust begrenzt. In den hydrogeologisch besonders sensiblen Bereichen der wasserführenden Schichten ist ein Feuchtigkeitsverlust nicht möglich. Wenn kein Feuchtigkeitsverlust auftreten kann, kommt es zu keinem Carbonatisierungsschwinden, sondern zu einem Carbonatisierungsquellen [Schäffel 2009]. Das bedeutet, dass sich die Porosität verringert und folglich auch die Wasserdurchlässigkeit sinkt. Jedoch kann es auch zu weiteren chemischen Angriffen kommen. Die genauen Auswirkungen sind noch nicht vollends erforscht und sind Gegenstand umfangreicher Untersuchungsprogramme [Riegger & Rolker 2014].

Die Materialeigenschaften der häufig vorhandenen quellfähigen Tonanteile der Hinterfüllung sind ebenfalls vom chemischen Milieu abhängig [Frank 1983, ASTM D-5084 2010]. Auf die Untersuchung der chemischen Auswirkungen wird hier nicht weiter

eingegangen. Die Randbedingungen für die Vergleichbarkeit der in dieser Arbeit durchgeführten hydraulischen und thermischen Untersuchungen sind jedoch gegeben (siehe Kap. 2.8).

### Hydraulik

Die Einteilung der Durchlässigkeitsbereiche ist in der DIN 18130-1 [1998] für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Böden definiert (Tabelle 4).

*Tabelle 4: Durchlässigkeitsbereiche von Böden in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  verändert nach DIN 18130-1 [1998], von Soos [1996] und Triantafyllidis [2011].*

$k_f$ [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	Bereich	Exemplarische Bodenart
unter $10^{-8}$	sehr schwach durchlässig	Ton
$10^{-8}$ bis $10^{-6}$	schwach durchlässig	Feinschluff
$10^{-6}$ bis $10^{-4}$	durchlässig	Grobschluff
$10^{-4}$ bis $10^{-2}$	stark durchlässig	Feinsand, Mittelsand
über $10^{-2}$	sehr stark durchlässig	Kies

Für die Hinterfüllbaustoffe von Erdwärmesonden werden unterschiedliche Richtwerte des Durchlässigkeitsbeiwertes angegeben. Die Internationale Gesellschaft für erdgekoppelte Wärmepumpen (International Ground Source Heat Pump Association) empfiehlt einen maximal zulässigen Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  [ASTM D 5084 2010] von  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [Skouby 2010]. Dieser Wert bezieht sich auf die Durchlässigkeit des reinen Hinterfüllbaustoffes, nicht auf die Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde.

Der  $k$ -Wert (nach ASTM 5084) entspricht der Durchlässigkeit bei Labortemperatur des Wassers und wird ggf. auf eine Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  umgerechnet ( $k_{20}$ ). Der  $k_f$ -Wert (nach DIN 18130-1) wird auf eine Wassertemperatur von  $10^\circ\text{C}$  umgerechnet. Dies kann aufgrund der unterschiedlichen Viskosität zu einer Differenz in einem Bereich von 25% führen (DIN 18130-1, 1998). Der Unterschied muss bei der Interpretation internationaler Vorgaben beachtet werden, auch wenn der Unterschied i.d.R. für die praktische Anwendung nachrangig ist.

Nach dem Endbericht zur Prüfung von Hinterfüllmaterialien für Erdwärmesonden der Abteilung Grund- und Trinkwasserwirtschaft der Landesregierung Oberösterreich, wird ein maximal zulässiger Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  der Hinterfüllbaustoffe von  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  vorgeschlagen [Niederbrucker & Steinbacher 2008, Niederbrucker 2010].

Baumann et al. [2003] haben in einer Studie im Auftrag des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) die Systemdurchlässigkeit von Brunnenanlagen

untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Durchlässigkeit des Systems höher ist, als die des reinen Materials. Nach dieser Studie liegt die Systemdurchlässigkeit von Brunnenanlagen in einem Bereich zwischen  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Die von Niederbrucker und Steinbacher [2008] durchgeführten Untersuchungen ergaben Systemdurchlässigkeiten in einem ähnlichen Bereich. Die beiden Studien werden in Kap. 8 detailliert beschrieben und diskutiert. Diesen Untersuchungen nach sind die Durchlässigkeiten der reinen Hinterfüllbaustoffe im Allgemeinen als sehr schwach durchlässig einzustufen und die Systemdurchlässigkeiten als schwach durchlässig.

Die Änderung der Porosität der Hinterfüllsuspension, im fließfähigen als auch festen Zustand, aufgrund ansteigender Druckverhältnisse mit der Tiefe des Bohrloches, ist vernachlässigbar [Lin 2006]. Da es sich bei der erhärtenden Suspension um die Bildung von wassergefüllten Poren handelt und die Dichte der Suspension als auch des Wassers in den relevanten Tiefen annähernd druckunabhängig sind, unterscheidet sich die Porosität eines Hinterfüllkörpers am Bohrlochfuß kaum von der Porosität eines oberflächennahen Hinterfüllkörpers. Der Luftporengehalt der einzubringenden Suspensionen ist als vernachlässigbar einzustufen, da es sich um fließfähige Suspensionen handelt [Schäffel 2009]. Somit ist davon auszugehen, dass ebenso die Durchlässigkeitseigenschaften weitestgehend tiefenunabhängig sind. Daher können Proben unter atmosphärischen Druckbedingungen hergestellt werden und die Messergebnisse auf den Realmaßstab übertragen werden.

## 2.6 Rechtliche Grundlagen

In Deutschland obliegt die Genehmigung von EWS-Anlagen bis 100 m Tiefe den unteren Wasserbehörden. Für die Bewertung eines Antrages gilt grundsätzlich § 5 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG). Dieser beinhaltet die „Allgemeine Sorgfaltspflicht“ [WHG 2009]. Demnach sind

„[...] nachteilige Veränderung der Gewässereigenschaften zu vermeiden [...]“.

[WHG 2009, § 5 Abs. 1 Satz 1].

Daher sind Genehmigungen nicht zu erteilen, wenn eine Gefährdung von schützenswerter Gütern besteht, wie Wasser oder Boden. Dies ist besonders für das Einbringen von potenziellen Verunreinigungen in den Untergrund, wie Bohrspülungszusätze oder Hinterfüllmaterialien [DGG & DGGT 2014]. Dabei sind die Benutzungstatbestände nach § 9 Abs.1 zu klären.

Auf Länderebene gelten die Landeswassergesetze. Diese sind Grundlage für die Einteilung von Wasser- und Heilquellenschutzgebieten.

„In den Schutzzonen I und II sind Bau und Betrieb von Erdwärmeanlagen generell verboten. In den Schutzzonen III / III A / III B kann als Einzelfallentscheidung [...] eine Erlaubnis erteilt werden“.

[DGG & DGGT 2014, S. 108]

Ab einer Tiefe von 100 m erfolgt die Bearbeitung des Antrages auf Errichtung einer EWS vom Bergbauamt. Grundlage stellt dabei das Bundesberggesetz (BbergG) [2006]. Nach § 3 Abs. 3 kann Antrag auf Gewinnung der Erdwärme als bergfreier Bodenschatz gestellt werden. Dies ist notwendig, da der Besitz eines Grundstückes nicht automatisch das Recht an dem Bodenschatz Erdwärme beinhaltet [DGG & DGGT 2014].

Technische Regelwerke und Normen haben einen gesetzesähnlichen Charakter [Seibel 2013]. Besonders wenn diese den Stand der Technik widerspiegeln. Die VDI 4640-2 [2001] befindet sich derzeit in der Überarbeitung [Reuß 2014]. Damit wird auf die Entwicklungen der letzten Jahre, u.a. im Bereich des Frost-Tau-Widerstandes reagiert. Für die Prüfung des FTW-Widerstands von Hinterfüllmaterialien für EWS liegt weder ein technisches Regelwerk, noch eine Norm vor.

## **2.7 Laborvorgaben**

Bei der Konstruktion der Messzellen sind die grundlegenden Größenempfehlungen der DIN 18130-1 [1998] zu beachten. Nach Abs. 5.8 der Norm sollte die durchströmte Probenfläche bei bindigen Böden nicht kleiner als  $A_{\text{Modell}} = 10 \text{ cm}^2$  und bei grobkörnigen Böden nicht kleiner als  $A_{\text{Modell}} = 20 \text{ cm}^2$  betragen. Da der Bereich der Durchlässigkeit der Hinterfüllmaterialien, dem von bindigen Bodenkörpern ähnelt, stellt diese Maßgabe ein Minimalkriterium dar.

Das Verhältnis von Größtkorn zu Probendurchmesser kann bei den untersuchten Hinterfüllbaustoffen nicht greifen, da es sich um ein durch Zementphasen zusammenhängendes Gefüge handelt. Die Forderung dient dazu, dass mögliche Inhomogenitäten der Bodenprobe ausgeglichen werden und ist rein anwendungsbezogener Natur. Bei einem industriell hergestellten Hinterfüllbaustoff werden die einzelnen Komponenten mit definierten Körnungslinien als Zuschlag vermischt. Inhomogenitäten der Körnung treten bei Hinterfüllbaustoffen nicht in dem Maße auf, wie bei gewachsenen Böden. Daher ist die Anwendung dieses Kriteriums für Hinterfüllbaustoffe nicht zielführend. Es wurde in diversen Studien belegt, dass die

Anwendung der DIN 1830-1 [1998] für die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Proben aus Hinterfüllmaterial für EWS praktikabel ist [Müller 2007, Niederbrucker & Steinbacher 2008, Albrecht & Frank 2010].

Das entwickelte Messverfahren soll grundsätzlich in der Lage sein, eine standardisierte, reproduzierbare und ortsunabhängige Materialprüfung zu ermöglichen.

## 2.8 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit

Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit von Böden kann nach der DIN 18130-1 [1998] durchgeführt werden. Die DGGT [1990, 2005, 2012a] empfiehlt die DIN 18130-1 auch für die Wasserdurchlässigkeitsprüfung von Dichtwandmassen heranzuziehen, welche der Zusammensetzung von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden ähneln. Diese beschreibt genau wie der Amerikanische Standard ASTM D 5084 [2010] oder die Europäische Vornorm DIN ISO/TS 17892-11 [2005] die Messung der hydraulischen Durchlässigkeit von Böden unter vollgesättigten Verhältnissen. Grundlage für diese Messverfahren liefert die von Darcy [1856] beobachtete Gesetzmäßigkeit der Wasserströmung bei der Konzeption der Fontänen von Dijon. Der lineare Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit des Wassers  $v$  in einem Bodenkörper und dem anliegenden hydraulischen Gefälle  $i$ , im Allgemeinen als das *Gesetz von Darcy* bezeichnet, ist die Grundlage für die Messung der Durchlässigkeit von wassergesättigten Böden (6) nach von Soos [1996].

$$v = k \cdot i \quad (6)$$

Mit

$v$  = Fließgeschwindigkeit des Wassers [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$k$  = Durchlässigkeitsbeiwert bei Prüftemperatur  $T$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$i$  = hydraulisches Gefälle [-]

Dabei wird das hydraulische Gefälle  $i$  nach der Gleichung (7) berechnet.

$$i = \frac{\Delta h}{l} \quad (7)$$

Mit

$\Delta h$  = hydraulische Druckspiegelhöhendifferenz [m]

$l$  = Länge des Prüfkörpers in Fließrichtung [m]



Die Fließgeschwindigkeit errechnet sich nach Gleichung (8).

$$v = \frac{\Delta V}{\Delta t \cdot A_{Modell}} \quad (8)$$

Mit

$\Delta V$  = Messvolumen, welches in der Zeit  $\Delta t$  den Prüfkörper durchströmt [m<sup>3</sup>]

$\Delta t$  = Zeitintervall der Durchflussmessung [s]

$A_{Modell}$  = durchströmte Prüfkörperfläche lotrecht zur Fließrichtung [m<sup>2</sup>]

Über Einsetzen der Gleichungen (7) und (8) in Gleichung (6) kann die Formel zur Berechnung der Durchlässigkeit  $k$  wie folgt geschrieben werden.

$$k = \frac{\Delta h \cdot \Delta V}{l \cdot \Delta t \cdot A_{Modell}} \quad (9)$$

Für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit im gesättigten Zustand wird die Länge des Prüfkörpers bei der Messung berücksichtigt. Diese entspricht i. A. nicht dem Fließweg des Wassers. Der Fließweg des Wassers ist aufgrund der Porenstruktur (Tortuosität) länger, da das Wasser durch die Kapillaren fließt [Bohne 1998, Becher 2008]. Da die Bodenproben jedoch im System untersucht werden, kann die Prüfkörperlänge für die Berechnung des Durchflusses verwendet werden.

Da die Messung stets unter Laborbedingungen stattfindet und dies im Allgemeinen nicht den in-situ Temperaturen entspricht, wird über einen Temperaturbeiwert  $\alpha_T$  der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  in  $k_f$  umgerechnet. Durch die Umrechnung wird der Einfluss der Temperatur auf die Viskosität des Wassers beachtet und auf eine Temperatur von 10 °C bezogen [DIN 18130-1 1998, Prinz & Strauß 2011]. Dieser Wert wurde gewählt, da für die meisten oberflächennahen Fragestellungen der Durchlässigkeit von Böden die Grundwassertemperatur in einem Bereich von 10 °C liegt. Liegen im speziellen Fall andere Grundwassertemperaturen vor, muss dies mit beachtet werden und in die Berechnung einfließen. Der Temperaturbeiwert zur Umrechnung auch 10 °C wird nach folgender Formel bestimmt [Bohne 1998; Langguth & Voigt 2004].

$$\alpha_T = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad (10)$$

Mit

$T$  = Temperatur des Prüfwassers [°C]

Somit ergibt sich die Formel für den Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  zur Gleichung (11).

$$k_f = \frac{\Delta h \cdot \Delta V \cdot \alpha_T}{l \cdot \Delta t \cdot A_{Modell}} \quad (11)$$

Bei der Anwendung dieser Gesetzmäßigkeit sind folgende Grundvoraussetzungen zwingend zu beachten.

#### *Gesättigter Zustand*

Die zu prüfende Probe muss eine relative Wassersättigung  $S_r = 1$  aufweisen. Bei Teilsättigung, also dem Vorhandensein einer Gasphase neben der festen und flüssigen Phase, kann der lineare Berechnungsansatz (11) nicht angewendet werden [DIN 18130-1 1998]. In diesem Fall müssen nichtlineare analytische Berechnungsmodelle wie von van Genuchten [1980] angewendet werden, um die teilgesättigte Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Wassersättigung zu berechnen. Es existieren auch empirische Näherungsformeln wie nach Kézdi, welche es jedoch im Spezialfall zu prüfen gilt [von Soos, 1996]. Die in dieser Arbeit geprüften Hinterfüllmaterialien werden im vollgesättigten Zustand gemessen. Hierzu wird die stationäre Strömung überprüft und somit die Güteklasse 1 [DIN 18130-1 1998] erreicht.

#### *Seitendruck*

Zur Vermeidung eventueller Umläufigkeiten am äußeren Rand der Prüfkörper, wird über eine Gummimembrane ein Seitendruck aufgebracht. Dieser soll mindestens 30 kPa über dem anliegenden Porenwasserüberdruck liegen, um so eine Verfälschung der Ergebnisse aufgrund äußerer Randumläufigkeiten zu vermeiden [von Soos 1996]. In diesem Bereich liegt auch der empfohlene Seitendruck für die Messung der hydraulischen Durchlässigkeit von Böden nach Frost-Tau-Belastungen nach ASTM D-6035 [2008]. Grundsätzlich kann über einen variablen Seitendruck ein tiefenabhängiger Spannungszustand simuliert werden. Dies wird in der Versuchsdurchführung (Kap. 4.1.5) näher beschrieben.

Die Abbildung 13 zeigt eine schematische Darstellung einer regulären Wasserdurchlässigkeitsmesszelle bei der ein Seitendruck (Zelldruck) aufgebracht werden kann. Der Seitendruck wird durch einen Flüssigkeitsdruck zwischen einer Membrane, die an den Prüfkörper anliegt, und einem zylindrischen Widerlager aufgebracht. Dadurch werden unplanmäßige Umläufigkeiten am Rand des Prüfkörpers vermieden [von Soos 1996] und es kann ein definierter Spannungszustand eingestellt werden [Anbergen et al. 2011a].

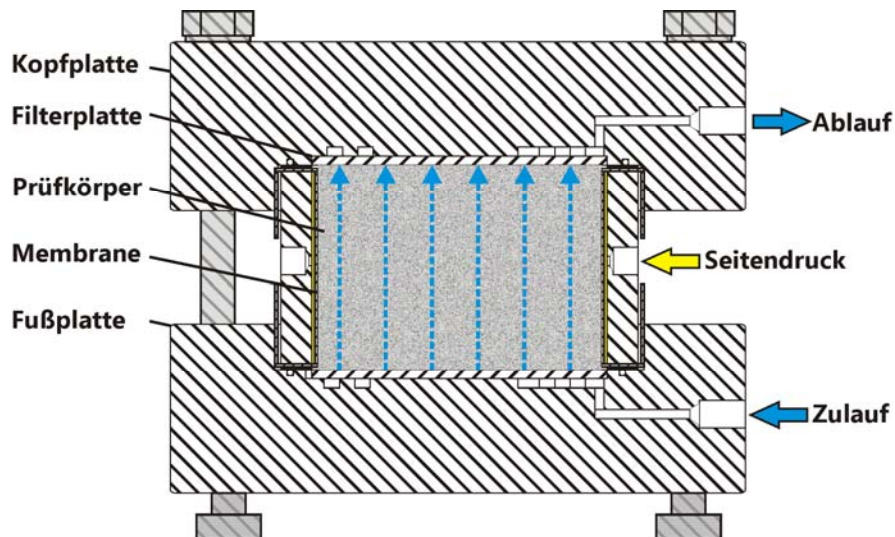


Abbildung 13: Schematischer Vertikalschnitt durch eine Wasserdurchlässigkeitsmesszelle. Über eine Membrane kann ein radialer Seitendruck aufgebracht werden.

#### Laminare Strömung

Bei der Versuchsdurchführung ist darauf zu achten, dass im Prüfkörper ein laminares Strömungsverhalten vorherrscht. Dabei sollte die Durchlässigkeit der Probe in einem angemessenen Verhältnis zum angelegten hydraulischen Gefälle stehen. Bei einer sehr geringen Durchlässigkeit kann es zu einem erhöhten Einfluss der Van der Waal'schen Kräfte kommen, welche in der Berechnung der Durchlässigkeit nach DIN 18130-1 [1998] nicht berücksichtigt werden. Der Anteil des Prüfmediums, welcher durch laminare Strömung transportiert wird, muss gegenüber dem Transport über Kapillarleitung oder Diffusion groß sein [VDZ 2002, Prinz & Strauß 2011]. Jedoch werden die Existenz und die genauen Strömungsvorgänge dieses Bereichs kritisch diskutiert [von Soos 1996].

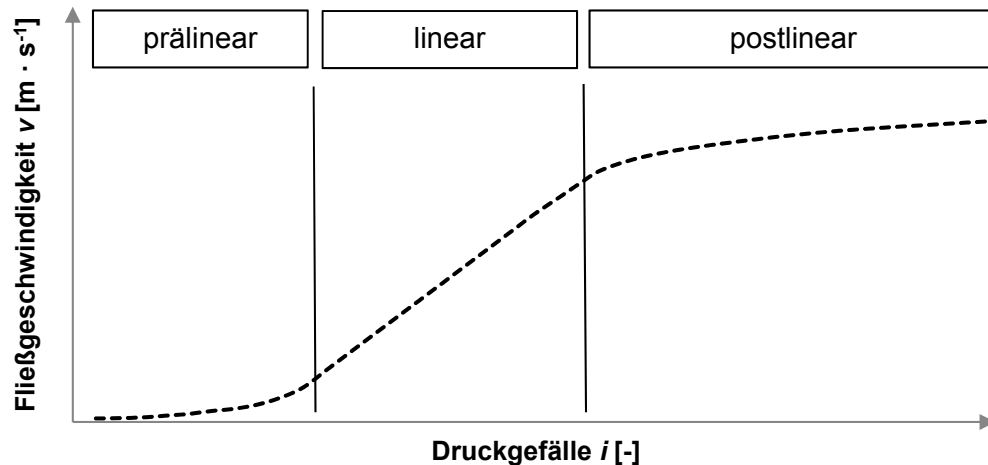


Abbildung 14: Schematische Darstellung des prälinearen, linearen und postlinearen Darcybereiches

Bei einer zu hohen Durchlässigkeit, verbunden mit hohen hydraulischen Gefällen, können Turbulenzen einen erhöhten, nicht erfassten Strömungswiderstand hervorrufen. Dieser würde ebenfalls bei der linearen Berechnung nicht beachtet werden und somit zu Fehlinterpretationen führen. Die Höhe des kritischen hydraulischen Gefälles ist dabei vom vorliegenden Boden abhängig. Dieser Bereich wird als *postlinearer* Bereich bezeichnet [DIN 18130-1 1998].

#### Prüfflüssigkeit

Die DIN 18130-1 [1998] empfiehlt die Verwendung eines Prüfwassers, welches der chemischen Zusammensetzung des Porenwassers der zu prüfenden Bodenprobe entspricht. Dazu wird in der Praxis häufig entlüftetes Leitungswasser verwendet. Die Entlüftung ist notwendig, um die Messung der vollgesättigten Durchlässigkeit (s.o.) zu gewährleisten. Das Leitungswasser entspricht häufig näherungsweise dem Porenwasser der zu untersuchenden Proben. In dem Fall der vorliegenden Arbeit, werden keine Bodenproben, sondern Hinterfüllbaustoffe geprüft. Dabei gilt es die Standortunabhängigkeit und Praktikabilität der Messung sicherzustellen. Aus diesem Grund werden die Messungen mit entionisiertem Wasser durchgeführt [Anbergen et al. 2014a]. Zwar besteht dabei grundsätzlich die Gefahr einer erhöhten Suffusion in den Proben aufgrund des hohen Lösungspotenzials des Wassers, jedoch werden andere chemische Umwandlungsprozesse durch hohe Salzfrachten oder anderen Verunreinigungen vermieden. Somit stellt für die einheitliche Prüfung der Hinterfüllbaustoffe die Verwendung von entionisiertem Wasser eine praktikable Lösung dar.

*Druckniveau*

Für Durchlässigkeitsversuche an Proben mit stark unterschiedlichen Durchlässigkeiten sollten die hydraulischen Gefälle dementsprechend angepasst werden. Nach ASTM D-5084 [2010] werden folgende Richtwerte angegeben.

*Tabelle 5: Empfohlene hydraulische Gradienten in Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes [ASTM D-5084 2010]*

<b>k [m/s]</b>	<b>Empfohlener hydraulischer Gradient</b>
$10^{-5}$ bis $10^{-6}$	2
$10^{-6}$ bis $10^{-7}$	5
$10^{-7}$ bis $10^{-8}$	10
$10^{-8}$ bis $10^{-9}$	20
unter $10^{-9}$	30

Die Anpassung der hydraulischen Gradienten intendiert zu verhindern, dass die Messung mit turbulenter Strömung durchgeführt wird, ohne dass dies vom Laborpersonal bemerkt wird. Weiterhin ist gemäß den einschlägigen Normen ein geeigneter Sättigungsdruck zu wählen, sollte der Sättigungsgrad des Prüfkörpers dies erfordern [DIN 18130-1 1998]. Es gilt dabei zu beachten, dass der gewählte Ansatz zur Bestimmung der Durchlässigkeit immer das System des Bodenkörpers bemisst. Das bedeutet, dass auch eventuell vorhandene präferierte Wasserwegsamkeiten mit einbezogen werden, wie es auch in-situ der Fall wäre [Abichou et al. 2004].



### 3 VORVERSUCHE

#### 3.1 Materialwahl für die Vorversuche

Die VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 [2001] lässt sowohl das Mischen einzelner Komponenten der Hinterfüllsuspension auf der Baustelle (sog. Baustellenmischungen) zu, als auch die Verwendung von Fertigprodukten mit Wasser. Auch wenn die Richtlinie grundsätzlich die Verwendung von Baustellenmischungen zulässt, wird dies vieler Orts durch die Leitfäden der Bundesländer [u.a. SSU 2012] und neueren Handlungsempfehlungen [DGG & DGGT 2014] nicht mehr angeraten. Durchfrostungsversuche der Hochschule Ostwestfalen-Lippe an Baustellenmischungen haben gezeigt, dass diese bei den angewendeten Testverfahren eine hohe Frostempfindlichkeit aufweisen [Müller 2009a]. Ähnliche Ergebnisse konnten bei den Untersuchungen von rein hydraulischen Bindemitteln für den Brunnenbau nachgewiesen werden [Anbergen et al. 2011a].

Es wird aus Qualitätsgründen die Verwendung werksseitig vorgemischter Materialien empfohlen, welche auf der Baustelle unter Zugabe von Wasser angemacht werden [UK Environment Agency 2011, DGG & DGGT 2014]. Bei Einhaltung eines werksseitig vorgegebenen Wasser-Feststoffwertes, können grundsätzliche Annahmen über die Materialeigenschaften in-situ getroffen werden, was bei Baustellenmischungen deutlich schwieriger ist. Aus der Praxis ist jedoch bekannt, dass eine Einhaltung der Anmachvorgaben und / oder eine Kontrolle dieser, nicht immer stattfindet oder möglich ist.

Für die Vorversuche wurden daher vier auf dem Markt erhältliche Fertigmischungen verwendet, welche nach Aussagen der für Hamburg zuständigen Genehmigungsbehörde vorherrschend für die Hinterfüllung von EWS verwendet werden. Die Bezeichnung erfolgt dabei in anonymisierter Form (hier: 1 bis 4). Die üblichen Suspensionseigenschaften [u.a. DGG & DGGT 2014] der vier verwendeten Materialien sind in nachfolgender Tabelle 6 dargestellt.

*Tabelle 6: Suspensionseigenschaften der vier Hinterfüllmaterialien für die Vorversuche*

<b>Materialbezeichnung</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
W/F-Wert [-]	0,60	0,55	0,82	0,80
Suspensionsdichte [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]	1,64	1,66	1,54	1,50
TAZ [s]	61	52	46	75
Absetzmaß [%]	1,1	1,3	0,6	1,8

### 3.2 Variation der Abbindetemperatur und -zeit

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden Durchlässigkeits- und Druckfestigkeitsversuche [DIN 18130-1, 1998, DIN 18136, 2003] an Prüfkörpern mit unterschiedlichen Abbindezeiten und –temperaturen durchgeführt [Albrecht & Frank 2010, Anbergen et al. 2011a, Arianta 2012]. Dabei wurden erhebliche Unterschiede der Materialparameter festgestellt. Der Hydratationsprozess der zementgebundenen Hinterfüllmaterialien ist temperatur- und zeitabhängig [Bentz et al. 1997, Kjellsen et al. 1991, Adam 2006]. Ebenso ist das Quellverhalten der, ggf. in den Mischungen vorhandenen, Bentonite zeitabhängig. Dementsprechend muss dies bei der Prüfung der Materialparameter von zementgebundenen Hinterfüllmaterialien beachtet werden [Anbergen et al. 2011b].

$$\begin{aligned}k_f &= f(t, T) \\ q_u &= f(t, T)\end{aligned}\tag{12}$$

Mit

$q_u$  = ungestörte Druckfestigkeit des Bodens bzw. der Probe [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

Bei der Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit nach DIN 18136 [2003] wurde angenommen, dass es sich um eine ungestörte Probe handelt, da das Material im Labor angemacht und gelagert wurde. Somit gab es keinen Bedarf einer Betrachtung als gestörtes Material.

Arianta [2012] hat in einer labortechnischen Studie die einaxialen Druckfestigkeiten der oben beschriebenen vier Hinterfüllbaustoffe untersucht, die Materialien wurden unter gleichen Bedingungen hergestellt. Von jedem Material wurden mindestens zwölf Prüfkörper für Messungen gemäß DIN 18136 [2003] hergestellt. Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte unter Verdunstungsschutz. Die Hälfte der Prüfkörper wurde unter Labortemperaturbedingungen gelagert (im Bereich von  $\pm 20^\circ\text{C}$ ). Die andere Hälfte wurde in einem Klimaschrank bei Simulation von in-situ Temperaturen bei  $10^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  gelagert. Die einaxiale Druckfestigkeitsprüfung erfolgte nach definierten Zeiten, 28 und 56 Tagen (Abbildung 15).



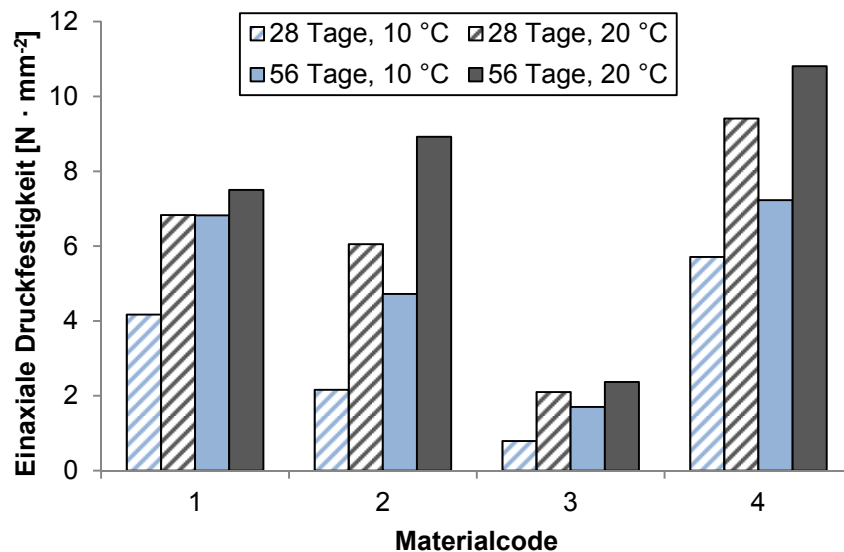


Abbildung 15: Druckfestigkeiten von vier ausgewählten Hinterfüllmaterialien in Abhängigkeit der Abbindezeit und Abbinde temperatur.

Die Messungen bestätigen die getroffenen Annahmen (12). Die Druckfestigkeiten der Prüfkörper mit längeren Abbindezeiten sind höher, als die der jüngeren. Analoges gilt für die Abbinde temperaturen. Dies wurde in Untersuchungen von Albrecht & Frank [2010] ebenfalls festgestellt. Bei dem Material 3 wird bei einer Lagerung bei 10 °C und einer Prüfung nach 28 Tagen Abbindezeit, die Mindestdruckfestigkeit von größer  $1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  nach DGG & DGGT [2014] nicht erreicht. Bei einer Abbinde temperatur von 20 °C wird das Kriterium erfüllt. Daher ist es notwendig für die Anforderungen an die Hinterfüllmaterialien stets die Prüfrandbedingungen mit anzugeben. Es ist ersichtlich, dass eine inkonsistente Prüfkörpervorbereitung die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beeinflusst bzw. diese unter Umständen unmöglich macht.

Weiterhin ist aus Abbildung 15 zu erkennen, dass die Zementkomponenten der geprüften Materialien unterschiedlich schnell hydratisieren. So ist bei Material 1 und Material 3 zu erkennen, dass bei der Lagerung unter 20 °C kaum noch eine Festigkeitserhöhung zwischen 28 Tagen und 56 Tagen stattfindet. Bei dem Material 2 hingegen ist eindeutig zu erkennen, dass eine flachere Festigkeitsentwicklung stattfindet. Da grundsätzlich langsam hydratisierende Zemente für Hinterfüllungen empfohlen werden [VDI 4640-2 2001, DGG & DGGT 2014], sollte für die Materialprüfung eine Mindestabbindezeit eingehalten werden. Die Empfehlungen des Arbeitsausschusses Uferbefestigungen Häfen und Wasserstraßen [DGGT 1990] empfiehlt in der Auflage von 1990 Prüfzeitpunkte nach 28 Tagen bzw. 56 Tagen Abbindezeit für die Prüfung von Dichtwandmassen.

Untersuchungen der Materialdurchlässigkeit an einem Hinterfüllbaustoff von Albrecht & Frank [2010] zeigen ebenfalls ein stark zeit- und temperaturabhängiges Durchlässigkeitsverhalten. Die Aussagen korrespondieren mit dem beobachteten Materialverhalten bei den Druckfestigkeitsuntersuchungen. Bei niedrigerer Abbinde­temperatur (7,5 °C), ist die Materialdurchlässigkeit höher als bei Prüfkörpern gleichen alters, jedoch mit höherer Abbinde­temperatur (20 °C).

Gerade bei zementbasierten Hinterfüllmaterialien muss der Hydratationsgrad mit einbezogen werden. Dieser hängt maßgeblich von der Lagerungstemperatur, der Abbindezeit und dem Wasserdargebot ab. Aus praktischen Gründen sollten diese Mindestinformationen den Prüfergebnissen beigefügt werden. Die Erkenntnisse über den Einfluss der Abbindebedingungen sind in die Konzeption der Prüfkörperherstellung, -lagerung und -prüfung miteingeflossen. Die Umsetzung wird in Kap. 4 näher beschrieben.

### **3.3 Beurteilungskriterien für Hinterfüllbaustoffe**

Bei den bisherigen Untersuchungen an Hinterfüllbaustoffen wurden häufig Beurteilungskriterien wie die Druckfestigkeit, Bestimmung des Massenverlustes durch Wägung oder Rissbestimmungen über Schalldurchlaufzeiten herangezogen. Dies sind indirekte Kennwerte, über welche auf die hydraulische Integrität des Hinterfüllbaustoffes geschlossen werden soll. Für die Messung der hydraulischen Durchlässigkeit von Böden gibt es eine Vielzahl von Normen und Verfahren [wie DIN 18130-1 1998, ASTM D-5084 2010, DIN ISO/TS 17892-11 2005]. Die Messung des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k_f$  in Anlehnung an die Verfahren für Böden stellt einen geeigneten Parameter zur Bewertung der Hinterfüllbaustoffe dar [Müller 2009a].

„Für eine zuverlässige Beurteilung der Frostbeständigkeit ist daher zu empfehlen, [...] die Wasserdurchlässigkeit in Triaxialzellen nach DIN 18130 [...] an befrosten und unbefrosten Prüfkörpern des Hinterfüllbaustoffs zu bestimmen.“

[Müller 2009a, S. 9]

Über den Durchlässigkeitsbeiwert sind direkte Aussagen bzgl. der hydraulischen Leitfähigkeit des Hinterfüllbaustoffen möglich. Dabei ist es wichtig auch die Kontaktfläche zwischen dem Hinterfüllmaterial und der Sonde zu berücksichtigen, da dies in-situ die schwerwiegendste potenzielle Schwachstelle darstellt [Baumann et al. 2003]. Dies wurde in bisherigen Untersuchungen meist ungenügend beachtet [Anbergen et al. 2013b].

## **4 ENTWICKLUNG DES FROST-TAU-WECHSEL-PRÜFVERFAHRENS**

### **4.1 Prüfverfahren für Hinterfüllbaustoffe**

#### **4.1.1 Anforderungen an das Prüfverfahren**

Die bisherigen Untersuchungen von Hinterfüllbaustoffen haben nicht oder nur teilweise die maßgeblichen Randbedingungen des Durchfrostungsprozesses *in-situ* abgebildet (Kap. 2.2.4). Basierend auf den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen und der Vorversuche (Kap. 3) wurden die folgenden vier notwendigen Bedingungen an die Prüfung von Hinterfüllbaustoffen formuliert, die das zu entwickelnde Prüfverfahren zu erfüllen hat [Anbergen et al., 2011a].

#### **4.1.2 Durchlässigkeitsbeiwert**

Es existieren Normen und Standards, welche die direkte Messung der hydraulischen Durchlässigkeit von Materialien und Systemen zulassen. Da der Durchlässigkeitsbeiwert über die direkte Messung Auskunft über den Flüssigkeitstransport gibt, ist dieser Parameter heranzuziehen und als Bewertungskriterium geeignet [Anbergen et al 2011b]. Weiterhin zeichnet sich die Messung des Durchlässigkeitsbeiwertes als ausgereiftes Verfahren aus, über welches breite Erfahrungen vorliegen [u.a. DIN 18130-1 1998, ASTM D-5084 2010]. Dadurch und aufgrund des relativ einfachen Aufbaus, ist dieses Verfahren auch ökonomisch abbildbar.

Bei der Messung ist es erforderlich die Systemdurchlässigkeit zu berücksichtigen, da diese signifikant höher ist und somit der kritische Parameter in der Bewertung der hydraulischen Integrität einer Hinterfüllung ist [Baumann et al. 2003, Niederbrucker & Steinbacher 2008, Frank & Albrecht 2010, Anbergen et al. 2011a]. Dabei wird die Systemdurchlässigkeit maßgeblich durch die Kontaktfläche zwischen Hinterfüllung und Sonde bestimmt. Die Kontaktfläche zwischen Hinterfüllung und umgebenden Boden ist nachrangig, wie Baumann et al. [2003] in deren Untersuchung beobachteten.

„An der Grenzfläche zum umliegenden Lockergestein scheint sich zumindest für den vorliegenden Fall eines angrenzenden Feinsandes keine präferenzielle Wegsamkeit für Sickerwässer auszubilden.“

[Baumann et al. 2003, S. 20]

Da für die Fragestellung der hydraulischen Integrität die Bereiche grundwassergeringleitenden Schichten von besonderem Interesse sind, kann davon ausgegangen werden, dass sich ebenfalls keine präferierte Wasserwegsamkeit ausbildet, wie es ggf. in stark durchlässigen Bereichen der Fall sein könnte.

### **4.1.3 Durchlässigkeitsbeiwert nach Frost-Tau-Beanspruchungen**

Um die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen zyklische Frost-Tau-Beanspruchungen in einer EWS zu überprüfen ist es notwendig die maßgeblichen Parameter vor und nach der Belastung zu messen [u.a. Müller 2007, Anbergen et al. 2011a]. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Prüfkörper neben der zu prüfenden Gefügestörung aus Frosteinfluss, keine Störung durch Arbeitsschritte im Labor (Ein und Ausbau aus einer Messzelle) erfährt. D.h. die Messung des FTW-Einflusses muss an Proben erfolgen, welche durchgehend über die gesamte Versuchsdauer in der Messzelle eingespannt sind. Nur so kann die Änderung der Durchlässigkeit aufgrund der FTW bestimmt und bewertet werden. Daher ist auch eine Messung nach der Durchfrostung unabdingbar [ASTM D-6035 2008, Anbergen et al. 2011a]. Die Auswirkungen der Durchfrostung hängen unter anderem von der Anzahl der Zyklen ab (2.3). In feinkörnigen Böden ist im Allgemeinen nach spätestens zehn FTW kein weiterer Anstieg der Durchlässigkeit zu erwarten [ASTM D-6035 2008]. Dies gilt es für die Prüfung von Hinterfüllbaustoffen zu überprüfen und ggf. bei abweichenden Frostverhalten die Anzahl der durchzuführenden FTW anzupassen. Daher muss das Verfahren grundsätzlich in der Lage sein eine beliebige Anzahl an FTW durchzuführen ohne die Probe aus der Messzelle auszubauen und wieder einzubauen.

### **4.1.4 Radiale Durchfrostung von innen nach außen**

Bei der Simulation der Durchfrostung des Hinterfüllmaterials muss die Richtungsabhängigkeit mit einbezogen werden. Wie unter Kap. 2.3 beschrieben ist der Ort der Eislinsenbildung von der Durchfrostungsrichtung abhängig.

Grundsätzlich kann der Temperaturfluss in einem Körper ein-, zwei-, oder dreidimensional stattfinden (Abbildung 16).

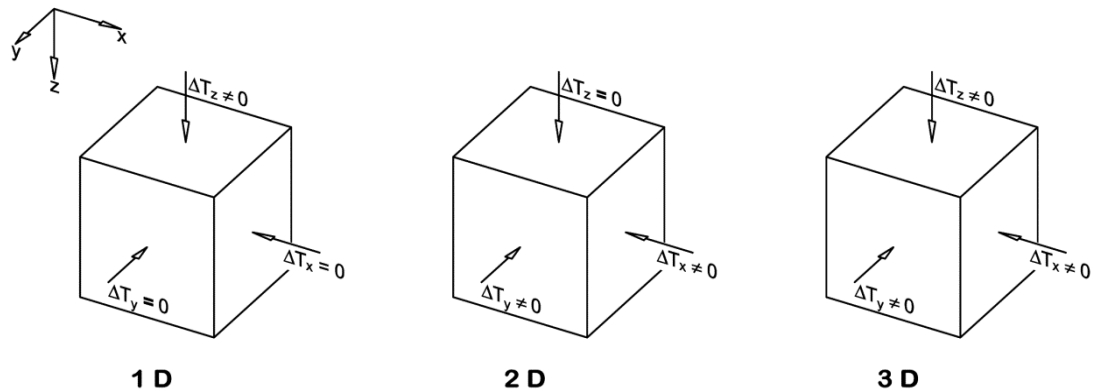
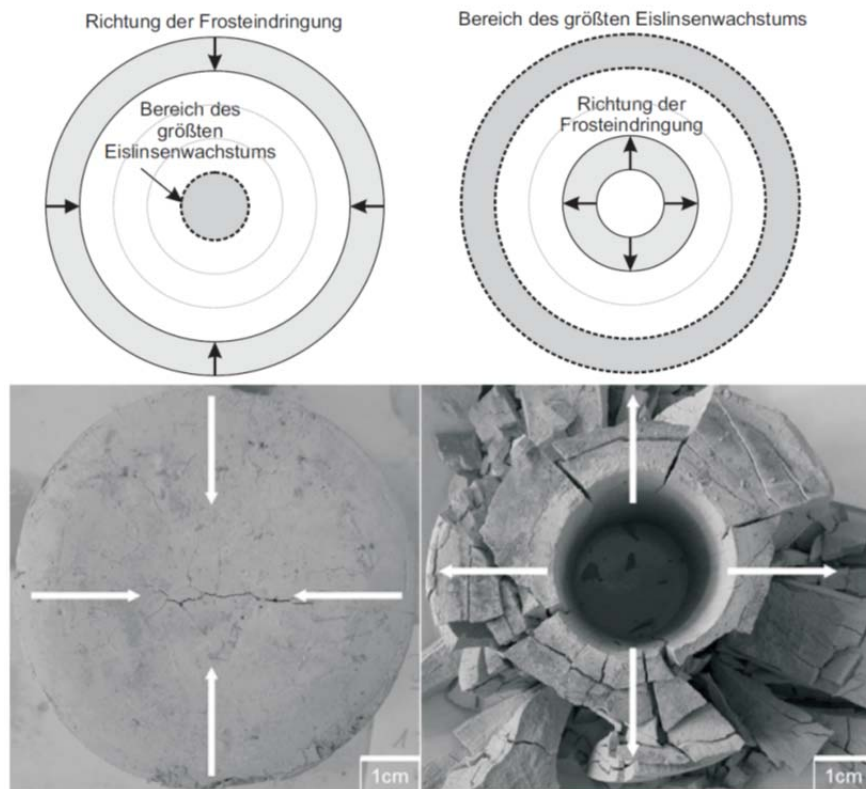


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Dimensionen des Wärmeflusses an einem Probevolumen.

Die bisher etablierten Normen und Standards für Materialversuche unter Frost-Tau-Belastungen empfehlen meist dreidimensionale Durchfrostungen, da diese verfahrenstechnisch leicht durchzuführen sind. Dabei werden die Prüfkörper im Regelfall in einem Klimaschrank von außen nach innen durchfrostet, wie in Kap. 2.2.4 beschrieben. Unter Einbeziehung der Richtungsabhängigkeit kommt es folglich tendenziell zu einem sphärischen Eislinnenwachstum im Zentrum des Prüfkörpers (Abbildung 17). Es ist ersichtlich, dass solch ein Testverfahren den tatsächlichen thermischen Prozess in der Hinterfüllung einer EWS nicht widerspiegelt. Daher kann der dreidimensionale Ansatz für die Konzeption des zu entwickelnden Prüfverfahrens nicht herangezogen werden.

Der ASTM Standard D-6035 [2008] empfiehlt neben der dreidimensionalen Durchfrostung auch einen eindimensionalen Ansatz. Das Regelwerk ist für die Untersuchung der hydraulischen Integrität von Deponieabdeckungen anwendbar und simuliert Belastungen durch witterungsbedingte FTW. Bei diesem Anwendungsfall ist der kritische Fließweg als primär vertikal anzusetzen, genauso wie die primäre Durchfrostungsrichtung (Abbildung 16, links). Es wird empfohlen diese Randbedingungen auch bei der Versuchsdurchführung einzuhalten. Dazu werden zylindrische Prüfkörper radial isoliert, so dass der Wärmetransport vorwiegend axial (eindimensional) stattfindet [Anbergen et al. 2014a]. Folglich kommt es nach Konrad & Morgenstern [1980] zu horizontalen Gefügeänderungen aufgrund der Eislinnenbildung. Diese sind dementsprechend orthogonal zur Fließrichtung der Prüfflüssigkeit [Othman & Benson 1993, Othman et al., 1994]. Bei der Betrachtung der Hinterfüllung einer EWS, ist es ersichtlich, dass der kritische Fließweg vertikal ist. Die betriebsbedingte Durchfrostung findet jedoch primär radial statt [VDI 4640-2 2001]. Demnach ist ein eindimensionaler Ansatz für die vorliegende Fragestellung ebenfalls nicht zielführend.

Die Radiale Durchfrostung von EWS führt zu Gefügeänderungen aufgrund der Eislinsenbildung, welche achsenparallel sind. Diese Gefügeänderungen können demnach zu einer deutlich erhöhten achsenparallelen Wasserwegigkeit führen, welche die kritische Fließrichtung ist, die untersucht werden soll. Daher ist für das zu entwickelnde Prüfverfahren ein zweidimensionaler Ansatz umzusetzen (Abbildung 16 mittig).



*Abbildung 17: Gegenüberstellung der Durchfrostungsrichtung von außen nach innen (links) und von innen nach außen (rechts). Schematische Darstellungen (oben) und Prüfkörper des gleichen Materials nach einer Frost-Tau-Belastung (unten).*

Neben der Festlegung der Dimension des Wärmeflusses ist auch die Richtung entscheidend. So muss bei der Simulation der Durchfrostung auch die Wärmestromrichtung wie in-situ beachtet werden, da andernfalls es zu einem nicht realitätsnahen Schadensbild und folglich zu Fehlinterpretationen eines eventuellen Versagensmechanismus kommt. So sind in Abbildung 17 zwei Prüfkörper des gleichen Materials abgebildet, welche unter identischen Bedingungen gelagert wurden. Der linke Prüfkörper wurde in einem Klimaschrank dreidimensional von außen nach innen durchgefrostet. Dabei stand der Prüfkörper in einem 0,5 cm hohen Wasserbad. Anschließend wurde der Prüfkörper im Labor an der Luft wieder aufgetaut und im Trockenofen getrocknet. Es ist zu erkennen, dass die stärksten Gefügeänderungen im Zentrum des Prüfkörpers sind. Der rechte Prüfkörper wurde ebenfalls durch einen FTW belastete, dieser erfolgte jedoch über ein axiales Rohr zweidimensional von innen nach

außen. Der Prüfkörper wurde dabei dreidimensional eingespannt und es wurde an den Stirnflächen ein Wasserdruck von 200 kPa angelegt. Es ist ersichtlich, dass die größten Gefügeänderungen am äußeren Rand des Prüfkörpers auftreten. Folglich ist für den Ort der frostbedingten Gefügeveränderung die Richtung der Durchfrostung von entscheidender Bedeutung. Daher muss die Durchfrostung von innen nach außen stattfinden [Anbergen et al. 2014a].

#### **4.1.5 Allseitige Dehnungsbehinderung**

Während der Durchfrostung von Hinterfüllbaustoffen kommt es zu einer Volumenveränderung. Diese Volumenänderung wird neben der Änderung der Dichte des Wassers, vorwiegend durch die Eiskristallbildung hervorgerufen. Dies wurde in diversen Untersuchungen bestätigt [Konrad & Morgenstern 1980, Unold, 2006, Herrmann 2007, Albrecht & Frank 2010, Anbergen et al. 2011a]. Die bisherigen Untersuchungen von Hinterfüllbaustoffen wurden meist ohne durchgängige, allseitige, mechanische Randbedingungen durchgeführt [Kap. 2.2.4 und vgl. Herrmann 2007, Niederbrucker & Steinbacher 2008, Kuckelkorn & Reuß 2013].

Weiterhin wurden die FTW-Simulation und die Durchlässigkeitsmessung in zwei getrennten Anlagen durchgeführt, so dass die Prüfkörper händisch überführt werden mussten. Bei diesem händischen Überführen ist eine Störung des durch Frost geschädigten Prüfkörpers nicht zu vermeiden. Bei dem Transport der Proben ist ein Aufklaffen eventueller Rissstrukturen aufgrund einer fehlenden seitlichen Spannungsrandbedingung höchst wahrscheinlich. Dies würde zu einer Fehleinschätzung des durch Frost hervorgerufenen Anstiegs der hydraulischen Durchlässigkeit führen. Daher ist sowohl die Simulation der Frostbelastung, als auch die Durchlässigkeitsprüfung, ohne händische Überführung durchzuführen. Dies gilt es in der Konzeption des Prüfverfahrens zu beachten. Um einen möglichen, unplanmäßigen Versatz der Rissstrukturen zu verhindern, gilt es einen radialen Überdruck während der gesamten Prüfdauer aufrechtzuerhalten. Weiterhin kann über einen variablen Seitendruck ein anisotroper Spannungszustand erzeugt werden, welcher u.a. für die Simulation einer tiefenabhängigen seitlichen Spannungsrandbedingung genutzt werden kann (Kap. 2.4).

Bei Voruntersuchungen [Albrecht & Frank 2010] und anderen Studien [u.a. Unold 2006, Herrmann 2007] wurde bei einer fehlenden allseitigen Dehnungsbehinderung eine nicht reversible Volumenvergrößerung beobachtet, analog zu Frosthebungen.

„Diese Versuche [zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechselwiderstands, d. Verf.] müssen zudem die im Untergrund vorherrschenden Druckverhältnisse [...] berücksichtigen.“

[Herrmann 2007, S.165]

Die Druckverhältnisse wurden in den vorherigen Studien nicht berücksichtigt. *In-situ* findet eine axiale Ausdehnung der Hinterfüllsäule durch das Eigengewicht praktisch nicht statt. Bei einer Prüfung ohne axiale Dehnungsbehinderung kommt es zu einem Auslängen der Prüfkörper [Frank & Albrecht 2010]. Für die Prüfung in Wasserdurchlässigkeitzellen muss die Oberfläche i.d.R. neu zugeschnitten werden, wodurch ein Massenverlust entsteht und folglich auch eine Veränderung der Durchlässigkeit. Daher ist eine axiale Dehnungsbehinderung während der FTW-Simulation zwingend erforderlich.

Auch die Ausrichtung der Eislinsen führt tendenziell zu einer radialen Ausdehnung und nicht zu einer axialen [Konrad & Morgenstern 1980]. Der radialen Ausdehnung steht der radiale Erddruck entgegen, welcher in Abhängigkeit zu der absoluten Verschiebungen aktiviert wird. Dieser ist weiterhin von den anstehenden Randbedingungen abhängig, wie Auflast, innerer Reibungswinkel des Bodens, Vorbelastung, Tiefe und andere [u.a. Smolczyk 1996, Gudehus 1996, Thomas & Kempfert 2011]. Die Möglichkeit des Aufbringens eines radialen Seitendrucks ist daher unabdingbar.

## 4.2 Messzelle

Die Grundlage für die entwickelte Frost-Tau-Wechselmesszelle bilden triaxiale Wasserdurchlässigkeitzellen in Anlehnung an DIN 18130-1 [1998]. Diese bestehen aus Kopf- und Fußplatten, sowie einem Seitenzylinder über welchen eine Membrane gespannt werden kann (Abbildung 18). Über Ventile an dem Seitenzylinder kann ein Flüssigkeitsdruck zwischen die Membrane und dem Zylinder als Widerlager aufgebracht werden, welcher den Prüfkörper über die Membran radial belastet. Der Seitendruck vermeidet weiterhin Randumläufigkeiten während der Versuchsdurchführung [von Soos, 1996]. Da dieser Seitendruck während des gesamten Prüfablaufes annähernd konstant gehalten werden soll, ist als Seitendruckflüssigkeit ein Fluid zu wählen, welches bei der FTW-Simulation in flüssiger Phase verbleibt, wie z.B. Wasser-Glykol-Gemische.



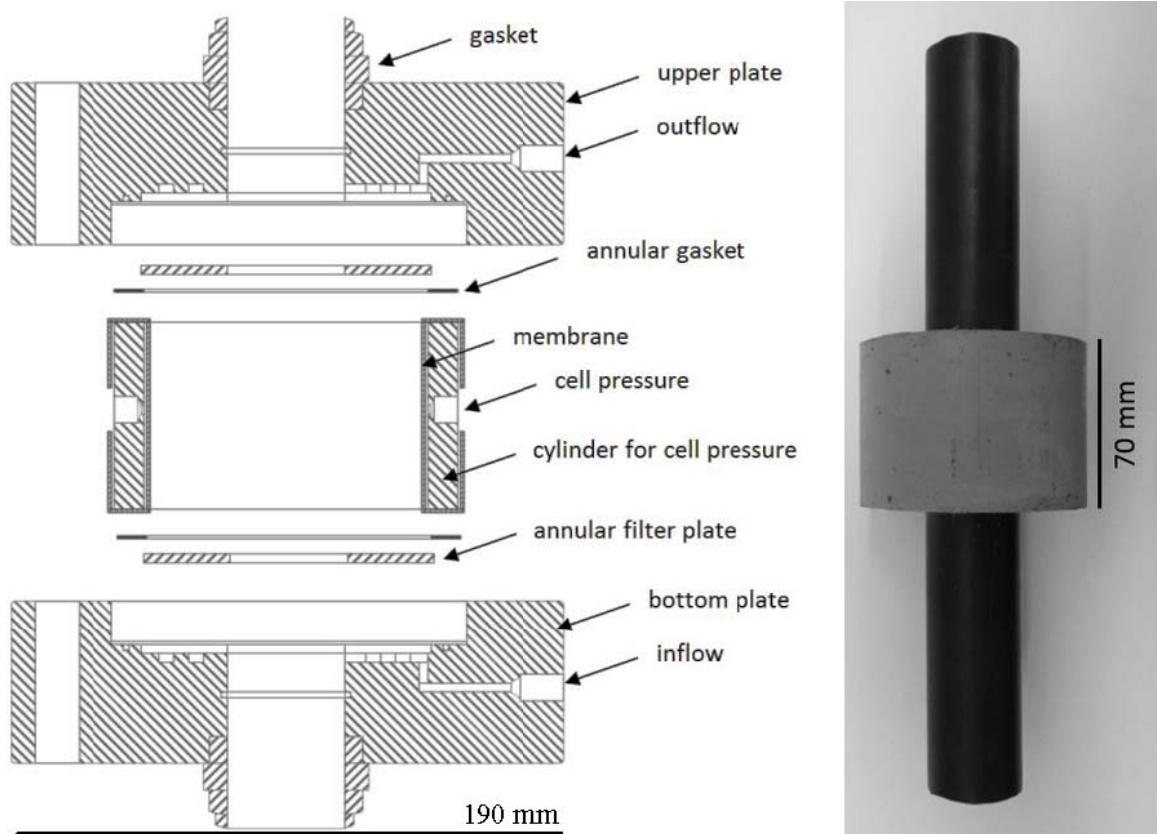
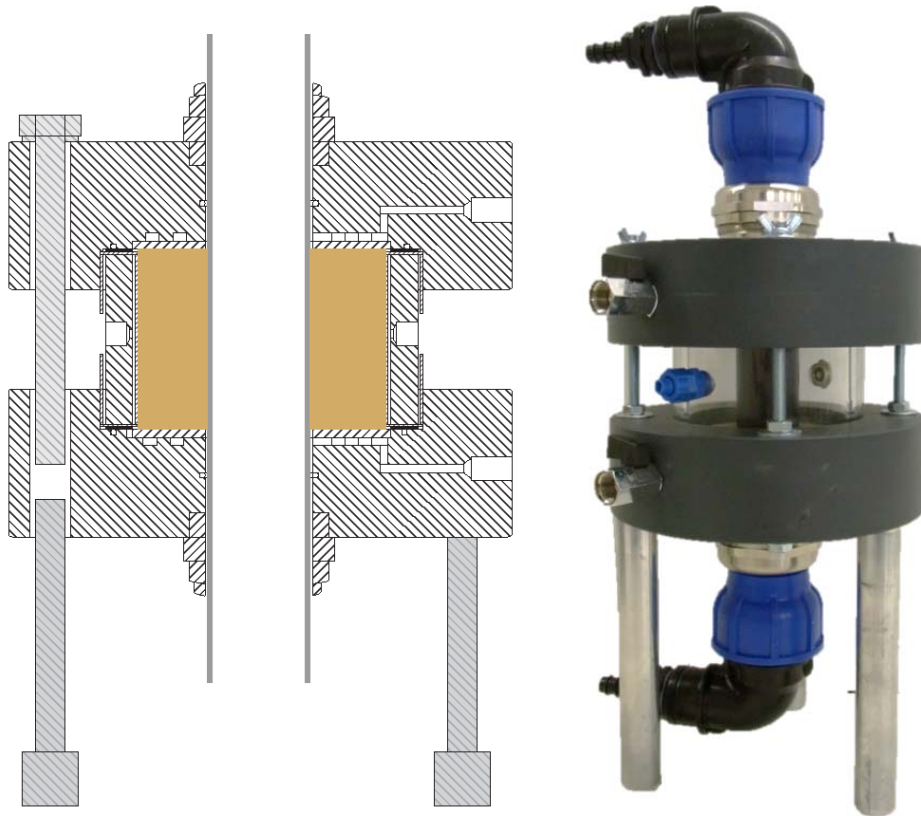


Abbildung 18: Schematischer vertikaler Schnitt durch die entwickelte Messzelle (links) und Prüfkörper bestehend aus einem mittigen Sondenrohr und einem ringzylindrischen Hinterfüllkörper (rechts) nach Anbergen et. al [2014a].

Die Messzelle ist so dimensioniert, dass Prüfkörper von 70 mm Höhe (Abbildung 18 rechts) bündig mit den Filterplatten abschließen und so eine axiale Dehnungsbehinderung realisiert wird. In der Kopf- und Fußplatte ist axial eine Öffnung vorhanden, durch welche das mittige Sondenrohr eines Prüfkörpers geführt werden kann. An den Öffnungen sind Quetschschraubungen angebracht, so dass der Innenraum der Messzelle druck- und wasserdicht verschlossen werden kann. Im geschlossenen Zustand (Abbildung 19) kann eine Prüfflüssigkeit über ein Ventil an der Fußplatte in den Innenraum der Messzelle geleitet werden.



*Abbildung 19: Geschlossenen Messzelle (Links: Schematische Zeichnung. Rechts: Fotografie).*

Die Prüfflüssigkeit wird über Verteilerrippen zu der Filterplatte geleitete, welche ein gleichmäßiges Anströmen des Prüfkörpers sicherstellt. Die Prüfflüssigkeit durchströmt den Prüfkörper von unten nach oben, wird über eine zweite Filterplatte geleitet und verlässt den Messzelleninnenraum wiederum über ein Ventil. Mit der notwendigen Peripherie kann so die hydraulische Durchlässigkeit der Prüfkörper bestimmt werden. Da die Rohrenden der Prüfkörper frei zugänglich sind, kann ein Wärmepumpenkreislauf an die Prüfkörper angeschlossen werden und diese beliebig, von innen nach außen, temperiert werden. Somit sind die vier oben genannten Prüfkriterien erfüllt.

Die Materialien der Messzellen sind so gewählt, dass diese bei den verwendeten Hinterfüllbaustoffen, Prüf- und Seitendruckflüssigkeiten, chemisch stabil sind und es zu keinen, den Prüfablauf negativ beeinträchtigenden, Umwandlungsprozessen kommt. Gerade bei den verwendeten Wasser-Glykol-Gemischen für den Seitendruck ist auf den chemischen Angriff zu achten, da diese auch Edelmetalle angreifen [Urbaneck 2012].

### **4.3 Aufbau der Prüfkörper**

Der in Deutschland am häufigsten gebaute EWS Typ ist die Doppel-U-Sonde mit einem Außendurchmesser von 32 mm [DGG & DGGT 2014]. Auf Grundlage dessen wurden die

Prüfkörper für die vorliegende Untersuchung maßstabsgetreu ausgelegt. Dabei wurde der Fokus auf das Verhältnis von der Kontaktfläche des Sondenmaterials mit dem Hinterfüllbaustoff zu der axialen Anströmfläche des Hinterfüllkörpers gelegt. Die Kontaktfläche zwischen Hinterfüllbaustoff und Sondenmaterial stellt aufgrund derer adhäsiven Eigenschaften eine präferierte Wasserwegigkeit dar [Baumann et al. 2003], welche bei dem vorliegenden Prüfkörperaufbau mit berücksichtigt wird (Systemdurchlässigkeit). Der schematische Aufbau der Prüfkörper orientiert sich an Prüfkörpern, welche von Sugama [2006] zur Untersuchung des Haftreibverhaltens von zementhaltigen Suspensionen an Metallrohren verwendet wurden. Die Prüfkörperabmessungen sind der Tabelle 7 zu entnehmen. Wie in Abbildung 18 zu erkennen, bestehen die Prüfkörper aus einem axial verlaufenden Rohrstück aus HDPE, das durch den zylindrischen Prüfkörper (Hinterfüllung) umgeben ist. Ein schematischer Horizontalschnitt durch einen Prüfkörper sowie durch eine idealisierte Doppel-U-Sonde ohne zusätzliches Hinterfüllrohr, ist in Abbildung 20 dargestellt.

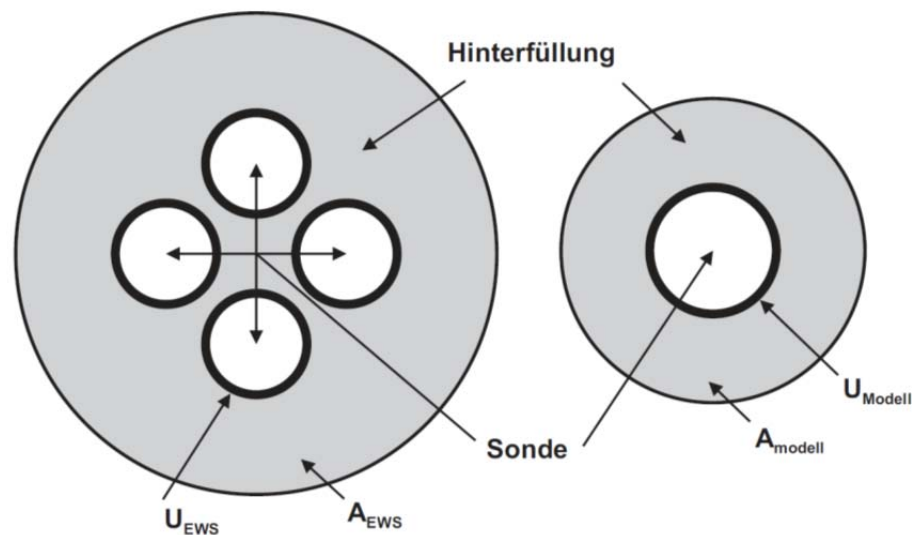


Abbildung 20: Schematischer horizontaler Schnitt durch eine Erdwärmesonde mit einer Doppel-U-Sonde (links) und einem Prüfkörper für die Frost-Tau-Wechseluntersuchungen (rechts).

Für die Maßstabsrechnung wurde von üblichen in Hamburg eingesetzten Bohrdurchmessern für EWS ausgegangen, welche bei dem genannten Sondentyp i.d.R. in einem Bereich zwischen 150 mm und 180 mm liegen [Anbergen et al. 2011a]. Die grundlegenden Daten für die Maßstabsrechnung sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

*Tabelle 7: Abmessungen für die Maßstabsberechnung typischer Erdwärmesonden zu den Prüfkörpermaßen.*

Parameter	Erdwärmesonde		Prüfkörper
Durchmesser der Hinterfüllung [mm]	150	180	96
Rohrdurchmesser [mm]	4 · 32	4 · 32	40
Rohrumfang U [mm]	402	402	126
axiale Anströmfläche A [mm <sup>2</sup> ]	14 455	22 230	5 982
$\frac{U}{A}$ [mm <sup>-1</sup> ]	0,028	0,018	0,021

Es ist ersichtlich, dass das Verhältnis von der Anströmfläche zum Umfang der Sondenrohre sowohl bei einer EWS, als auch bei dem aufgestellten Modell, als gleich anzusehen ist.

$$\frac{U_{EWS}}{A_{EWS,150mm}} \geq \frac{U_{Modell}}{A_{Modell}} \geq \frac{U_{EWS}}{A_{EWS,180mm}} \quad (13)$$

Somit wird bei den Prüfkörpern der Einfluss der Systemdurchlässigkeit maßstabsgetreu mit einbezogen.

#### 4.4 Probenherstellung und Probenlagerung

Für die Vergleichbarkeit der Untersuchungen ist es unabdingbar einen vereinheitlichten Herstellungs- und Lagerungsprozess der Prüfkörper zu implementieren. Zwar werden die Hinterfüllsuspensionen auf der jeweiligen Baustelle mit dem dort zur Verfügung stehenden Wasser angemacht, was zu Varianzen der Materialeigenschaften führt, jedoch sollten bei einer Eignungsuntersuchung derartige Einflüsse gering gehalten werden. Eine Wasseranalyse der Standorte, an denen bisher Prüfkörper hergestellt wurden, ist in der Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: *Analysenergebnisse<sup>3</sup> der örtlichen Wasserversorger der verwendeten Anmachwässer für die Probenherstellung*

	Standort A	Standort B	Standort C
<b>pH-Wert [-]</b>	7,6 - 7,8	7,3 – 7,7	7,3
<b>Natrium [mg · l<sup>-1</sup>]</b>	59	10 – 12	7
<b>Kalium [mg · l<sup>-1</sup>]</b>	2,7	1,5 – 4,6	1,7
<b>Calcium [mg · l<sup>-1</sup>]</b>	87	101 – 114	118
<b>Sulfat [mg · l<sup>-1</sup>]</b>	108	65 – 109	127

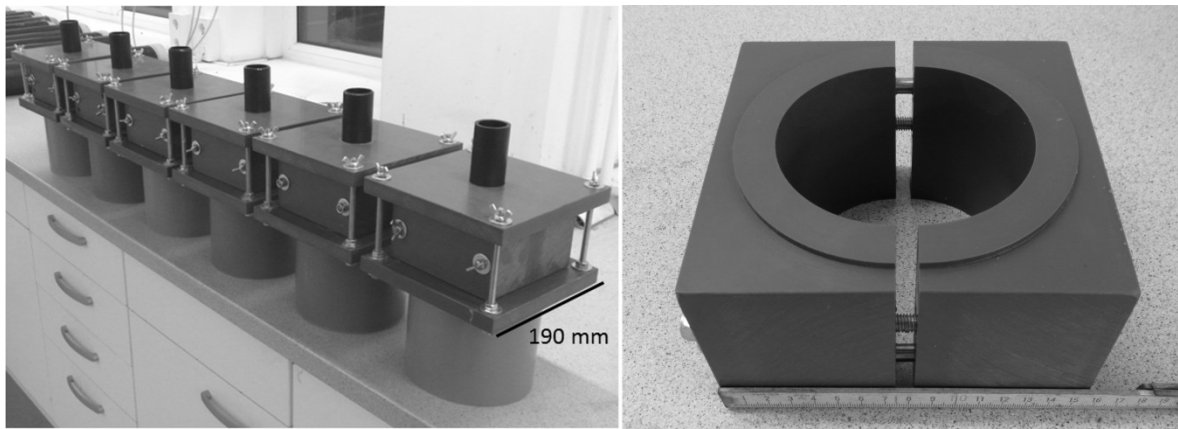
Zwar schwanken die Salzgehalte und die pH-Werte der verwendeten Wässer, jedoch liegen die Werte in einem grundsätzlich ähnlichen Bereich, so dass von einer Vergleichbarkeit der an den Standorten hergestellten Prüfkörper ausgegangen werden kann.

Das Anmachen der Hinterfüllsuspension erfolgt dabei nach einheitlichen Verfahrensvorgaben. So werden die abgewogenen Mengen von Fertigmischung und Wasser bei Raumtemperatur in einem Behälter fünf Minuten mit einem Wendelquirl vermischt [vgl. Bentz et al. 1997]. Dabei beträgt die Umdrehungsgeschwindigkeit des Rührwerkes 300 Umdrehungen pro Minute. Dies entspricht einer typischen Umdrehungsgeschwindigkeit von kleinen Chargenmischern, wie sie häufig auf Baustellen verwendet werden [Anbergen et al. 2013b]. Es existieren auf dem Markt auch Mischanlagen mit deutlich höheren Umdrehungszahlen, z.B. Kolloidalmischer, die das Material durch höhere Scherkräfte besser homogenisieren. Jedoch kann zum Zeitpunkt der Untersuchungen nicht davon ausgegangen werden, dass diese Mischtechnik flächendeckend auch bei kleineren Unternehmen in Deutschland verwendet wird. Ein Anmachen der Suspension mit der gewählten Umdrehungszahl stellt somit einen konservativen Ansatz zur Materialprüfung dar [Anbergen et al. 2013b]. Bei einer signifikanten Änderung der Anmachbedingungen auf den Baustellen können die Umdrehungszahlen den Marktbedingungen angepasst werden.

Es wird darauf geachtet, dass es zu keinen Inhomogenitäten oder groben Absetzungen am Rand des Behälters kommt. In einem weiteren Arbeitsschritt wird die Suspension umgetopft und erneut für zwei Minuten gerührt. Anschließend können die Prüfkörper gegossen werden.

<sup>3</sup> Analyseergebnisse der Wasserversorger; Jahresmittelwerte 2011 und 2012

Da das Rohrstück aus anlagentechnischen Gründen exakt axial in den Hinterfüllkörper eingebunden sein muss, war es notwendig, Gießanlagen für eine präzise und einheitliche Herstellung zu entwickeln. Diese sind in Abbildung 21 links dargestellt.



*Abbildung 21: Gießanlagen für die Prüfkörperherstellung (links) mit seitlich zu öffnenden Gießhülsen (rechts) [Anbergen et al., 2014a]*

Nach einem anfänglichen Prototyp einer Gießanlage für die zeitgleiche Herstellung von drei Prüfkörpern [Anbergen et al. 2011a], wurden die abgebildeten Gießanlagen konzipiert und hergestellt. Diese bestehen aus einer unteren und oberen Platte, welche das Rohrstück exakt mittig fixieren. Zwischen den beiden Platten wird eine Gießhülse fixiert (Abbildung 21, rechts), die seitlich geöffnet werden kann. Mit diesen Gießanlagen ist die formeinheitliche und praktikable Herstellung von Prüfkörpern aus den geprüften Hinterfüllsuspensionen möglich. Durch den robusten Aufbau der Gießanlagen ist ein potenzieller Baustelleneinsatz denkbar.

Als Lagerungsbedingung wurden zwei Randbedingungen als maßgeblich angesetzt: Zum einen muss die Bodentemperatur simuliert werden, wie bereits in den Vorversuchen dargestellt. Zum anderen muss die Wasserverfügbarkeit für den Hydrationsprozess der Zementkomponenten definiert werden.

Die Simulation des in-situ Temperaturniveaus wurde durch die Prüfkörperlagerung in Klimaschränken umgesetzt. Nach dem Gießen der Prüfkörper verblieben diese für maximal 24 Stunden unter Labortemperaturbedingungen. Im Anschluss wurden die Prüfkörper bis zum Prüftermin in einem Klimaschrank gelagert, in welchem die Temperatur eingestellt werden kann. Da Klimaschränke, wie auch reguläre Kühlschränke, über Wärmepumpen temperiert werden, schwanken die Innentemperaturen konstruktionsbedingt.

Über die Aufzeichnung der Temperaturspreizungen in dem Klimaschrank kann überprüft werden, ob diese Schwankungen in einem akzeptablen Toleranzbereich liegen. Die Abbildung 22 zeigt exemplarisch die Temperaturüberwachung eines, der bei den Versuchen am Prüfstandort C eingesetzten, Klimaschranks für die Prüfkörperherstellung.

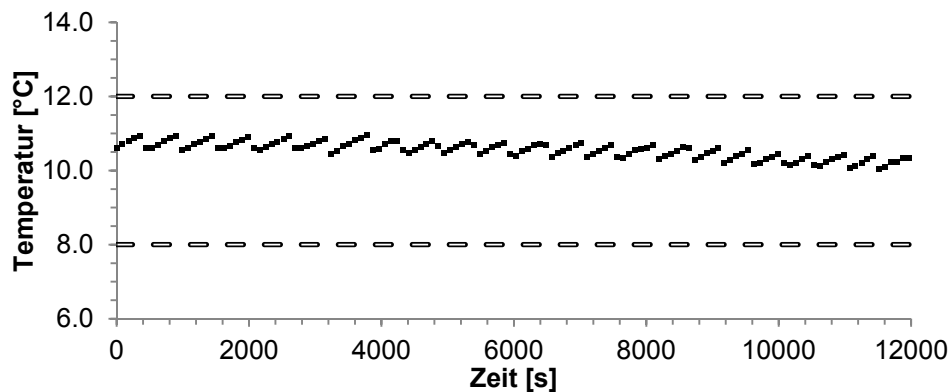


Abbildung 22: Temperaturmessung (Messintervall 90 s) im Klimaschrank für die Prüfkörperlagerung. Die gestrichelten Linien (8 °C und 12 °C) markieren die Toleranzgrenzen für die Temperaturschwankungen.

Es ist aus der Temperaturmessung zu erkennen, dass das zyklische Arbeiten der Wärmepumpe zu Temperaturschwankungen führt, welche jedoch in einem akzeptablen Bereich liegen. Die Abbildung 23 stellt die gemessenen Minimal- und Maximaltemperaturen in einem weiteren, bei den Versuchen am Standort A eingesetzten Klimaschrank dar. Der verwendete Datalogger misst im 5 s Takt die Temperatur und gibt einen 24 h Maximal- und Minimalwert an. Die Ablesung der Werte erfolgte bedarfsorientiert.

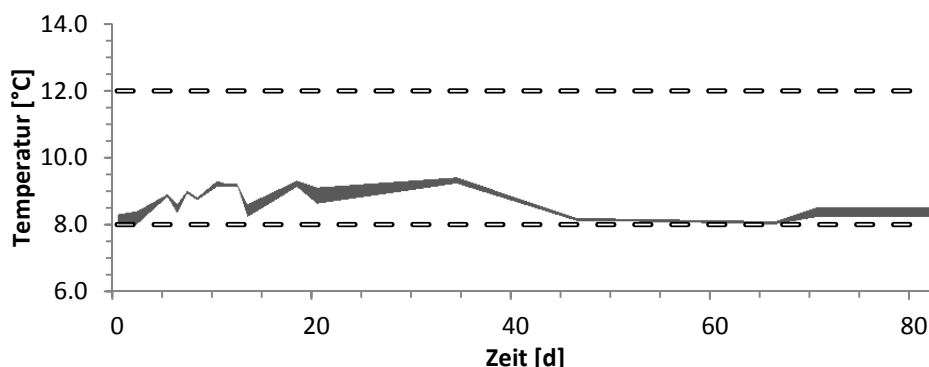


Abbildung 23: Darstellung der Maximal- und Minimaltemperaturen (24 h Intervall) im Klimaschrank für die Prüfkörperlagerung. Der grau hinterlegte Bereich definiert den Temperaturschwankungsbereich, die gestrichelten Linien (8 °C und 12 °C) markieren die Toleranzgrenzen für die Temperaturschwankungen.

Neben der Lagerungstemperatur gilt es die Wasserverfügbarkeit zu definieren. Bei dem vorliegenden Anwendungsfall soll die hydraulische Integrität in dem Bereich von Grundwassergeringleitern überprüft werden. In diesen meist bindigen Schichten ist mit einem deutlich geringeren Wasserzufluss zu rechnen, als in stark grundwasserleitenden Schichten. Bentz et al. [1997] haben den Einfluss unterschiedlicher Feuchtigkeitsmilieus auf den Hydratationsprozess von Zementsuspensionen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass eine verdunstungsgeschützte Lagerung zu einer verlangsamten Hydratation führt, im Gegensatz zu einer unbeschränkten Wasserzufuhr. Für die vorliegende Betrachtung muss folglich eine derartige Lagerung realisiert werden, wie es auch Niederbrucker & Steinbacher [2007] postuliert haben.

Mit den gewählten Lagerungsbedingungen kann von einem realitätsnahen, auf der sicheren Seite liegenden, Ansatz der Prüfung ausgegangen werden. Für die Festlegung des Prüfzeitpunktes wurde das fiktive Zementalter berücksichtigt. So wurde ein Prüfzeitpunkt in Anlehnung an die DGGT [1990], BAW [2004] und den Untersuchungen von Wischers & Dahms [1970] umgesetzt und 28 Tage bzw. 56 Tage Abbindezeit vor dem Messbeginn gewählt.

#### **4.5 Peripherie zur Durchführung von Frost-Tau-Wechsel-Versuchen**

Die Messzelle ist darauf ausgelegt die Systemdurchlässigkeit der Prüfkörper zu messen sowie die relativen Durchlässigkeitsänderungen aufgrund der zyklischen FTW Belastungen. Um Aussagen über den absoluten Durchlässigkeitsbeiwert und dessen relative Änderung treffen zu können und dabei die Bedingungen aus Kap. 2.8 zu erfüllen, sind präzise Messinstrumente für die Versuchsdurchführung notwendig. Die einzelnen Messanlagen können dabei variieren (siehe hierzu Kap. 5.2.2).

Neben der Laborausstattung für die Durchlässigkeitsversuche sind weitere Geräte für die Durchführung der FTW erforderlich. Zentrales Element ist dabei die Wärmepumpe zur Temperierung der Wärmeträgerflüssigkeit. Diese ist in einen Kälte-Umwälzthermostaten integriert, welcher über die Umwälzpumpe den Temperierkreislauf betreibt. Aus thermodynamischen Gründen gilt es sicherzustellen, dass die in den Temperierkreislauf integrierten Messzellen parallel geschaltet sind und eine gleichmäßige hydraulische Auslegung durchgeführt wurde [Ammon 2011]. Die Kühlleistung des Thermostaten muss dabei ausreichen, um die geforderten Temperaturkurven für die Abkühlung der Prüfkörper bereitzustellen.



Der Auftauprozess ist dabei in der Regel der unkritischere Arbeitsschritt der Versuchsdurchführung, da die Messzellen in üblichen Laboratorien aufgestellt werden, in denen Raumtemperaturen in einem Bereich von 20 °C herrschen. Aufgrund des Raumtemperaturniveaus werden die Messzellen isoliert, um den Wärmezustrom von außen nach innen zu reduzieren. Über Temperaturmessungen zwischen dem eingebauten Prüfkörper und der Wandung des Seitenzylinders der Messzelle wird überwacht, ob die Prüfkörper bis auf Temperaturen im negativen Celsiusbereich abgekühlt werden.

Die geforderte Infrastruktur ist in den meisten Erdbaulaboratorien, welche in der Lage sind triaxiale Scherversuche durchzuführen, vorhanden oder kann mit geringem finanziellen Aufwand nachgerüstet werden. Somit sind grundsätzliche Voraussetzungen für eine praktikable und flächendeckende Umsetzung des Prüfverfahrens erfüllt.

## 4.6 Prüfkonzzept

Für die Prüfung von Hinterfüllmaterialien mit dem entwickelten Verfahren sind folgende grundlegende Arbeitsschritte vorgesehen:

- 1) Anmachen der Hinterfüllsuspension und Gießen der Prüfkörper
- 2) Verdunstungsgeschützte Prüfkörperlagerung (28 bis 56 Tage) im Klimaschrank bei *in-situ* Temperaturbedingungen
- 3) Zuschnitt der Prüfkörper
- 4) Einbau der Prüfkörper in die Messzellen
- 5) Sättigung der Prüfkörper und Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes
- 6) Vollständige Durchfrostung der Prüfkörper über eine Temperierung mit einer Wärmeträgerflüssigkeit, welche durch das Prüfkörperrohr von unten nach oben strömt (-10 °C)
- 7) Messtechnischer Nachweis der Temperatur an der Prüfkörperaußenseite von  $\leq 0$  °C
- 8) Vollständiges Auftauen der Prüfkörper über eine Temperierung mit der Wärmeträgerflüssigkeit (+8 °C)
- 9) Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes
- 10) Wiederholung der Schritte 6 bis 9 für mindestens 6 FTW bzw. bis kein weiterer Anstieg der Durchlässigkeit zu verzeichnen ist
- 11) Ausbau der Prüfkörper und visuelle Begutachtung
- 12) Trocknung der Prüfkörper bei 105 °C im Trockenschrank
- 13) Erneute visuelle Begutachtung

Die Prüfung von Produkten ohne Zementkomponenten und Tonpellets ist dabei analog durchzuführen. Die Durchführung von mindesten sechs Frost-Tau-Zyklen ist aufgrund der bisherigen Untersuchungen und dem Vergleich mit ähnlichen Untersuchungen aus der Literatur nach der Erfahrung des Autors einzuhalten. Dabei wurde sich besonders an den Arbeiten von Benson & Othman [1993] und dem ASTM Standard D-6035 [2008] orientiert. Die visuellen Begutachtungen dienen dabei der Einordnung eventuell auftretender Anstiege der hydraulischen Durchlässigkeit.

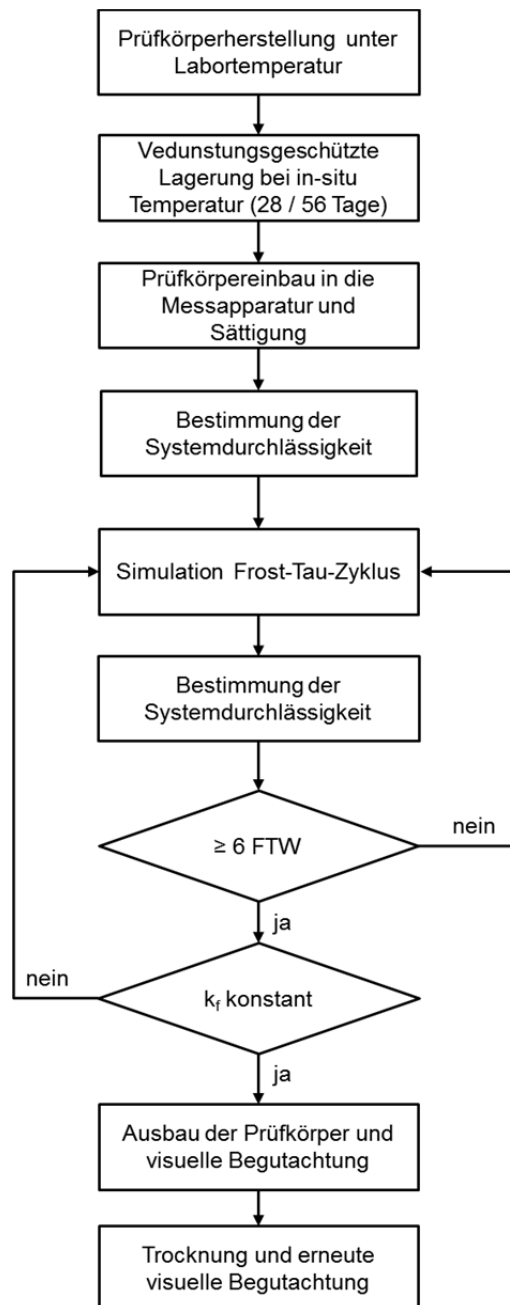


Abbildung 24: Flussdiagramm des Prüfkonzepthes.

Das Prüfkonzepht basiert auf Anbergen et al. [2011a].

## 5 EXPERIMENTELLE VALIDIERUNG

### 5.1 Allgemeines

Für die Validierung wurden die Messzellen an unterschiedliche Versuchsstände zur Prüfung der Wasserdurchlässigkeit angeschlossen und Wasserdurchlässigkeitsversuche mit verschiedenen Materialien durchgeführt. Es wurden jeweils drei Messzellen parallel eingesetzt, um so einen direkten Vergleich zu erzielen. Weiterhin war es so möglich eine größere Anzahl an Versuchen durchzuführen.

Es wurden zwei Kalibrierungsmaterialien gewählt, um die Standortunabhängigkeit des Messverfahrens zu untersuchen. Neben den Kalibrierungsversuchen wurden experimentelle Ermittlungen der Temperaturverteilungen während der FTW-Simulationen im Inneren der Prüfkörper durchgeführt. Die Fließwege innerhalb der Prüfkörper wurden mittels Farbtracer visualisiert und mit bisherigen Beobachtungen zum Durchlässigkeitsverhalten von Hinterfüllbaustoffen abgeglichen.

Weiterhin wurde der Einfluss der Anzahl von zyklischen Frost-Tau-Belastungen auf die hydraulische Durchlässigkeit untersucht. Dazu wurden Sonderversuche mit einer hohen Anzahl an FTW-Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Langzeitversuches wurden ebenfalls mit der Literatur zur Frostprüfung von feinkörnigen Böden abgeglichen und diskutiert.

Die statistische Auswertung der Messungen erfolgte auf Basis des ASTM E-177 [2013] und ASTM E-691 [2013]. Der mittlere Durchlässigkeitsbeiwert berechnet sich nach Gleichung (14).

$$\overline{k_f} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_{f,i} \quad (14)$$

Mit

$\overline{k_f}$  = mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$n$  = Anzahl der Werte [-]

So wird als Streuungsmaß der Messungen die Standardabweichung gemäß Gleichung (15) ermittelt.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (k_{f,i} - \overline{k_f})^2} \quad (15)$$

Mit

$s$  = Standardabweichung [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Da die ermittelten Durchlässigkeiten i.d.R. in einem *durchlässigen* bis *sehr schwach durchlässigen* Bereich liegen und damit die absoluten Zahlenwerte klein sind, wird für die Beurteilung der Güte der Messung die gewichtete Standardabweichung berechnet. Diese wird als Variationskoeffizient (engl. coefficient of variation) bezeichnet und berechnet sich nach Gleichung (16).

$$VC = \frac{s}{\overline{k_f}} \quad (16)$$

Mit

$VC$  = Variationskoeffizient [-]

Der Variationskoeffizient ist dimensionslos und es können darüber die Streuungen der jeweiligen Messreihen miteinander verglichen und die Güte der Messung eingeschätzt werden [Bleymüller 2012]. Bei der Bewertung gilt es zu beachten, dass es sich um geotechnische Messungen handelt, welche natürlichen Schwankungen unterliegen. So empfiehlt z.B. der ASTM D-5084 [2010] bei einer Messung mit konstantem Druckgefälle und einer Durchlässigkeit  $\leq 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  eine Messung als beendet einzustufen, wenn vier aufeinander folgende Messung über nicht mehr als 100 Prozent streuen. Bei höheren Durchlässigkeiten sollen die Messungen nicht mehr als 50 Prozent streuen. Gleiches gilt nach der DIN CEN/TS 14418 [2005] für die Bestimmung des FTW-Einflusses auf die hydraulische Durchlässigkeit von geosynthetischen Tondichtungsbahnen.

Es ist ersichtlich, dass bei Wiederholungsmessungen oder Vergleichsmessungen mit Schwankungen in ähnlichen, bzw. sogar größeren, Bereichen zu rechnen ist. Dies gilt es bei der Bewertung der Messergebnisse zu berücksichtigen. Nach ASTM D-5084 [2010] sind die Durchlässigkeitsbeiwerte auf zwei signifikante Stellen anzugeben. Eine höhere Genauigkeit ist i.d.R. nicht erzielbar. Für die Visualisierung der Messergebnisse werden diese jedoch teilweise genauer unterteilt, um die Charakteristik der Streuung zu verdeutlichen. Dabei gilt es zu beachten, dass es sich in diesen Sonderfällen um rein rechnerische Werte handelt und die Messungenauigkeit, wie weiter unten beschrieben, mit einzubeziehen sind.

Nach der ASTM D-5887 [2009] für die Durchlässigkeitsermittlung von geosynthetischen Tonbahnen werden für die statistische Auswertung der Durchlässigkeitsbeiwerte die logarithmierten Werte verwendet. Dies führt bei der Berechnung der Variationskoeffizienten zu deutlich geringeren Werten. Für die hier durchgeführten Betrachtungen wird ein konservativer Ansatz gewählt, so dass die Variationskoeffizienten auf den tatsächlichen Durchlässigkeitsbeiwerten basieren, wodurch tendenziell Werte zu erwarten sind.

## **5.2 Kalibrierung**

### **5.2.1 Materialien für die Kalibrierung**

An jeder Durchlässigkeitsanlage nach DIN 18130-1 [1998], an die die Messzellen angeschlossen wurden, wurden Kalibrierungsversuche mit zwei Kalibrierungsmaterialien durchgeführt. Für die Wahl der Kalibrierungsmaterialien wurden die folgenden grundlegenden Anforderungen festgelegt:

#### *Verfügbarkeit*

Das Kalibrierungsmaterial muss auf dem freien Markt erhältlich sein, damit standort- und personenunabhängig das Material bezogen und die Kalibrierung durchgeführt werden kann.

#### *Mineralogische Stabilität*

Das Material darf keine Reaktion auf Wasser zeigen, wie Quellen oder sonstige Änderungen des Kristallgitters.

#### *Chemische Stabilität*

Das Material soll weitestgehend inert und nicht wasserlöslich sein, damit keine Randeinflüsse die Kalibrierung der Messzellen verfälschen.

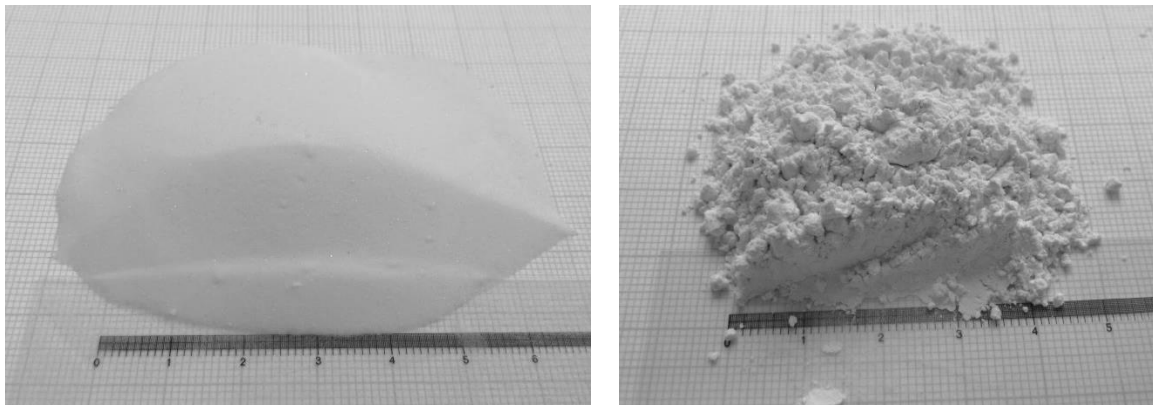
#### *Industrielle Qualität*

Um eine gleichbleibende und vergleichbare Qualität des Materials sicherzustellen, wurde vorausgesetzt, dass das Material industriell hergestellt werden soll. Dadurch wird Sorge getragen, dass zu große Schwankungen in der Kornfraktion des Materials, die Vergleichbarkeit der Kalibrierungsversuche negativ beeinflussen, nicht vorhanden sind.

### *Schüttbarkeit*

Die Materialien müssen grundsätzlich in der Lage sein sich den Abmessungen der Messzelle anzupassen und auch in jeglichen anderen Durchlässigkeitsmesszellen einbaubar zu sein.

Auf Grundlage dieser Anforderungen wurden zwei Kalibrierungsmaterialien ausgewählt. Als *Kalibrierungsmaterial A* wurde ein Glasstrahlgut<sup>4</sup>, als *Kalibrierungsmaterial B* ein Quarzmehl<sup>5</sup> gewählt. Die Materialien sind in Abbildung 25 dargestellt.



*Abbildung 25: Kalibrierungsmaterial A (links) und Kalibrierungsmaterial B (rechts) im lufttrockenen Zustand auf Millimeterpapier.*

Die beiden Kalibrierungsmaterialien können kostengünstig aus dem Fachhandel bezogen werden und eignen sich für die vorliegende Vergleichsuntersuchung. Die Herstellerangaben bezüglich Korngrößenverteilung der beiden Materialien wurden experimentell überprüft. Dabei wurde der Körnungsbereich des Materials A, welcher laut Hersteller zwischen 40 und 70  $\mu\text{m}$  liegt, qualitativ durch Siebungen mit einer Maschenweite von 63  $\mu\text{m}$  und 125  $\mu\text{m}$  überprüft, da eine Schlämmanalyse nach DIN 18123 [2011] bei dem Material nicht durchführbar war. Die Herstellerangaben konnten bestätigt werden. Die Analysen des Materials B sind der Abbildung 26 zu entnehmen.

---

<sup>4</sup> Glasstrahlperlen AbraVer der Fa. Brümmer Strahlmittel GmbH & Co. KG, Hamburg

<sup>5</sup> Quarzmehl Microsil M 10 der Fa. Euroquarz GmbH, Dorsten

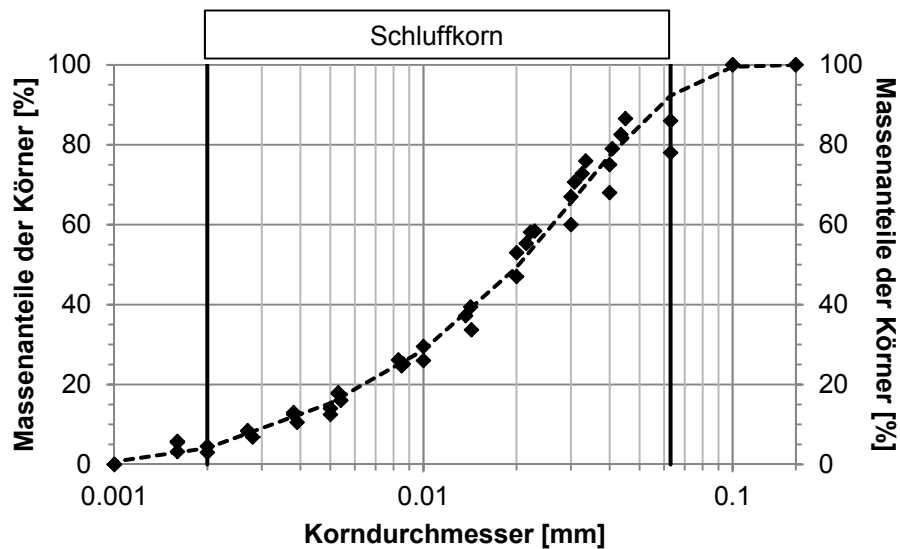


Abbildung 26: Korngrößenverteilung des Kalibrierungsmaterials B. Ergebnisse von fünf Schlämmanalysen gemäß DIN 18123 [2011]. Die gestrichelte Linie markiert die Herstellerangabe.

Es ist ersichtlich, dass die durchgeführten Korngrößenanalysen die Herstellerangabe bestätigen. Für eine erste Abschätzung der zu erwartenden Durchlässigkeitsbereiche, wird häufig die empirische Abschätzung nach Hazen angewendet [Abichou et al. 2004, Triantafyllidis 2011, Prinz & Strauß 2011]. Die Abschätzung ist zwar nicht einheitengetreu, gibt unter bestimmten Voraussetzungen jedoch erste Hinweise auf die Durchlässigkeit eines Bodens und wurde über eine große Anzahl von Untersuchungen weitestgehend bestätigt. Die Abschätzung nach Hazen kann für Ungleichförmigkeitszahlen kleiner gleich fünf angewendet werden. Die Ungleichförmigkeitszahl  $C_U$  wird dabei nach Gleichung (17) bestimmt.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} [cm] \quad (17)$$

Mit

$d_{10}$  = Korndurchmesser für den 10%-igen Siebdurchgang einer Körnungslinie [cm]

$d_{60}$  = Korndurchmesser für den 60%-igen Siebdurchgang einer Körnungslinie [cm]

Nach der obigen Korngrößenverteilung liegt der  $C_U$ -Wert in einem Bereich zwischen 5 und 7. Somit liegt der Wert am Rande des Gültigkeitsbereiches der empirischen Abschätzung nach Hazen wie in Gleichung (18) dargestellt. Für eine erste Abschätzung des Durchlässigkeitsbereiches soll diese Abschätzung angewendet werden.

$$k_f [m \cdot s^{-1}] = 1 \sim 1,5 \cdot d_{10}^2 [cm] \quad (18)$$

Eine Abschätzung der Größenordnung der Durchlässigkeit ist in Abbildung 27 dargestellt und die zugehörigen Annahmen in Tabelle 9 aufgelistet.

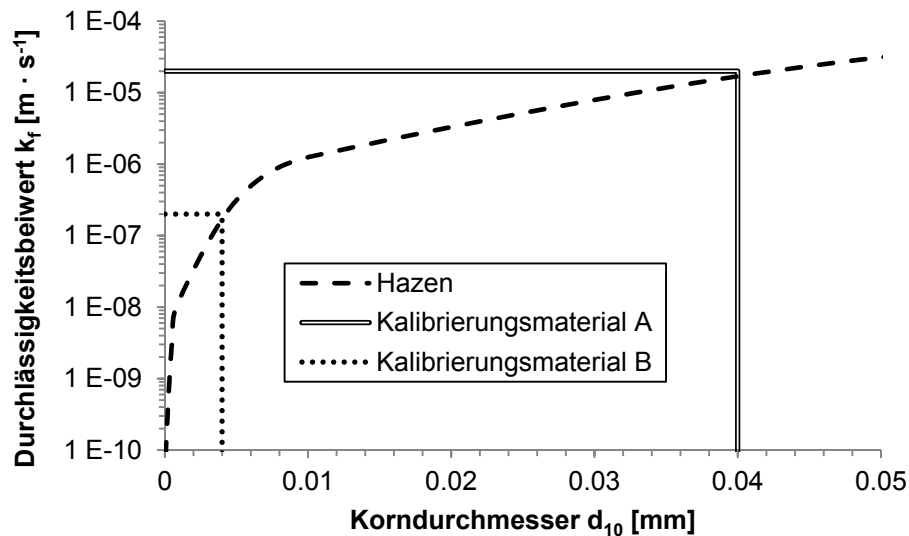


Abbildung 27: Abschätzung der zu erwartenden Durchlässigkeiten der auf ihre Eignung geprüften Kalibrierungsmaterialien nach Hazen.

Tabelle 9: Abschätzung des zu erwartenden Durchlässigkeitsbereiches der auf ihre Eignung geprüften Kalibrierungsmaterialien

Parameter	Kalibrierungsmaterial A	Kalibrierungsmaterial B
Annahme $d_{10}$ [cm]	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$k_f$ nach Hazen [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$\sim 1 \cdot 10^{-5}$	$\sim 1 \cdot 10^{-7}$
Durchlässigkeitsbereich	durchlässig	schwach durchlässig

Dabei wurde aufgrund der Herstellerangabe bei dem Material A ein Wert von  $d_{10} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$  gewählt, für das Material B entsprechend der Analyseergebnisse einen Wert von  $d_{10} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$ . Demnach ist bei dem *Kalibrierungsmaterial A* ein durchlässiges Verhalten, bei dem *Kalibrierungsmaterial B* ein schwach durchlässiges Verhalten zu erwarten. Die beiden Materialien wurden für die Durchführung von Kalibrierungsversuchen als geeignet befunden.



## 5.2.2 Implementierung der Messzellen in drei Versuchsanlagen

### 5.2.2.1. Anlagentyp I

Der Anlagentyp I versorgt die Messzellen über Doppelbüretten mit dem für die Versuchsdurchführung erforderlichen Wasser. Die Messung des Durchflusses erfolgt dabei über die Ablesung der Wasserstände in den jeweiligen Büretten. Über die Büretten können für diese Applikation nahezu beliebige Prüfdrücke inkl. Gegen- bzw. Sättigungsdruck aufgebracht werden. Über einen Vorhaltebehälter kann ebenfalls ein Seitendruck aufgebracht werden. Die Messung der absoluten Drücke erfolgt dabei sowohl über Messuhren, als auch über Digitalmanometer. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 28 dargestellt.

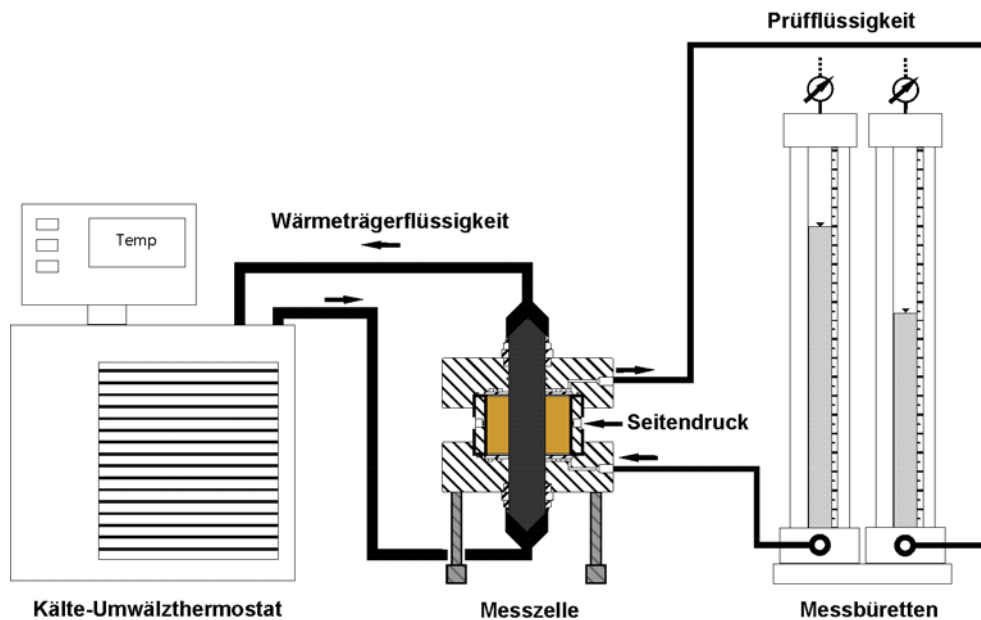


Abbildung 28: Schematischer Aufbau des Anlagentyps I für die Durchführung von Frost-Tau-Wechselversuchen nach Anbergen et al. [2014a]

Mit dem Kalibrierungsmaterial A wurden mit dem Anlagentyp 22 Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind der Abbildung 29 zu entnehmen.

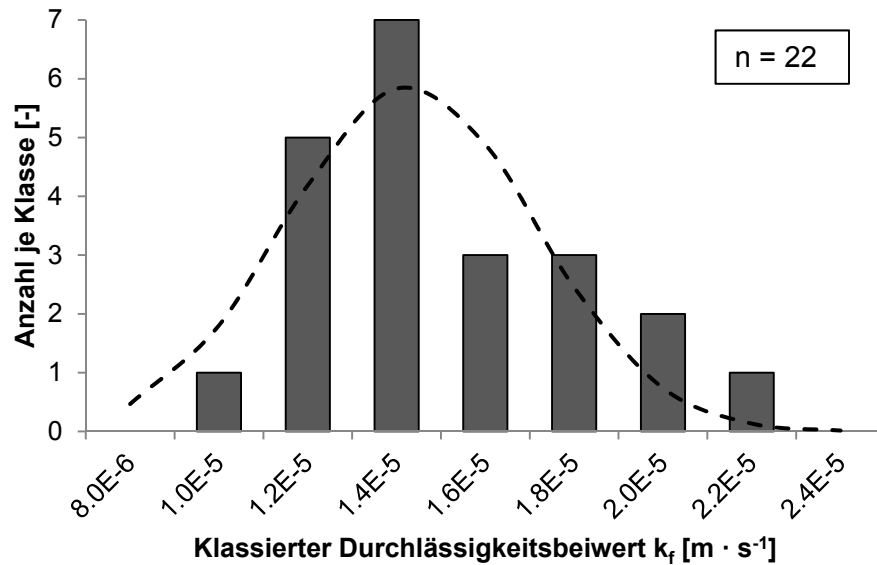


Abbildung 29: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial A am Anlagentyp I. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz.

Die Ergebnisse der 28 Versuche mit dem Kalibrierungsmaterial B sind nachfolgender Abbildung 30 zu entnehmen.

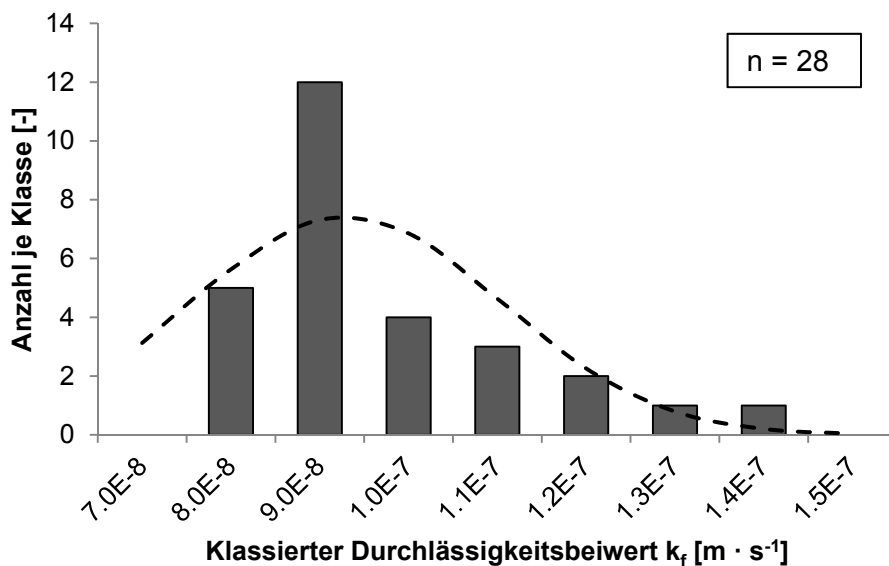


Abbildung 30: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial B am Anlagentyp I. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz.

### 5.2.2.2. Anlagentyp II

Der Anlagentyp II besteht aus einem Vorhaltebehälter mit dem für die Versuchsdurchführung erforderlichen Wasser. Dieser wird über einen einstellbaren Druck beaufschlagt. Das Prüfwasser wird durch die Messzellen geleitet und in einem Messgefäß druckfrei aufgefangen. Der Seitendruck kann über einen weiteren, mit Druck beaufschlagten Behälter aufgebracht werden. Die Druckmessung erfolgt dabei ebenfalls über Druckuhren und digitale Manometer.

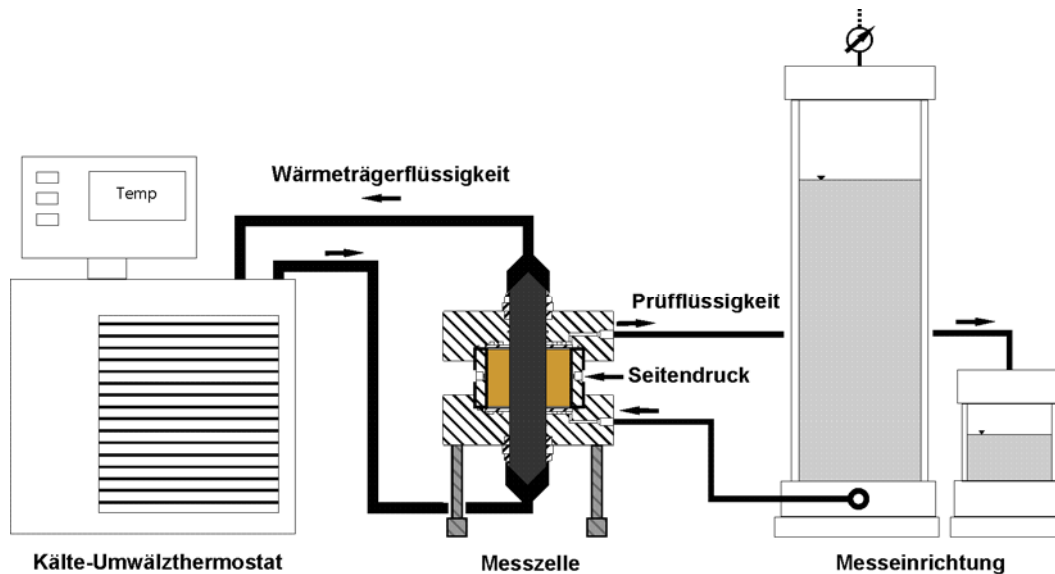


Abbildung 31: Schematischer Aufbau des Anlagentyps II für die Durchführung von Frost-Tau-Wechselversuchen

Die Kalibrierungsmaterialien wurden dabei unter Variation der hydraulischen Gefälle getestet, um zu überprüfen ob die Messungen in dem *linearen Bereich* (siehe Kap. 2.8) durchgeführt wurden. Dazu wurde das Material in drei Messzellen eingebaut und zwanzigfach die Durchlässigkeit bestimmt [Manns 2013]. Die Ergebnisse an dem Kalibrierungsmaterial A sind in folgender Abbildung 32 mit linear skalierten Achsen dargestellt.

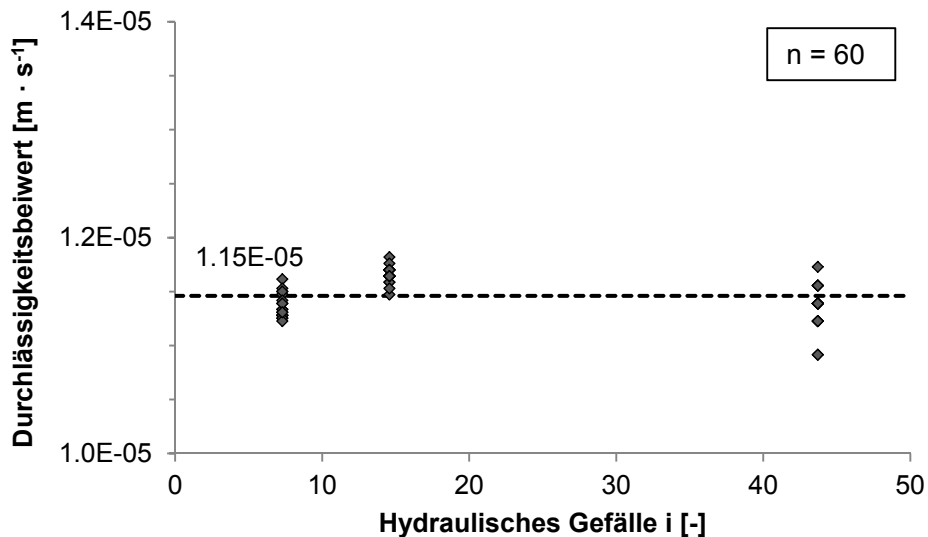


Abbildung 32: Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit dem Kalibrierungsmaterial A in Abhängigkeit vom hydraulischen Druckgefälle am Anlagentyp II. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert.

Es ist ersichtlich, dass die Messwerte zwar streuen, jedoch die Proportionalität des Durchflusses und des Druckgefälles gegeben ist, da sich der Durchlässigkeitsbeiwert über das Druckgefälle nicht wesentlich ändert. Die Abbildung 33 zeigt die Verteilung der Ergebnisse.

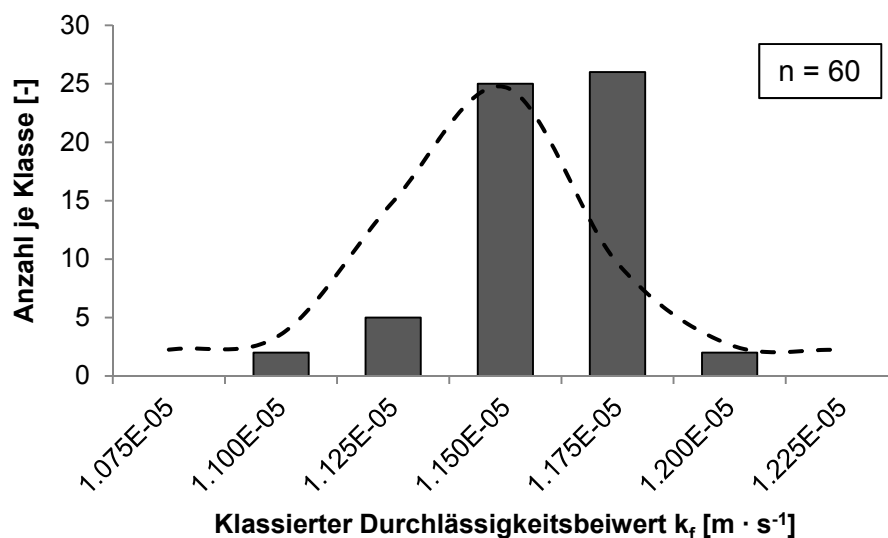


Abbildung 33: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial A am Anlagentyp II. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz.

Erwartungsgemäß schwanken die Ergebnisse aus obiger Abbildung sehr geringfügig. Die rechnerisch ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte auf drei Nachkommastellen dienen dabei lediglich der Visualisierung der Streuung.

Im Rahmen einer Studie von Manns [2013] wurde an den entwickelten Messzellen Versuche mit dem Kalibrierungsmaterial B unter erhöhten hydraulischen Gradienten durchgeführt. Dabei wurden ebenfalls drei Probeneinbauserien mit jeweils 20 Messungen durchgeführt. Die hydraulischen Gradienten lagen in einem erhöhten Bereich von ca. 40 bis 80. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 34 dargestellt.

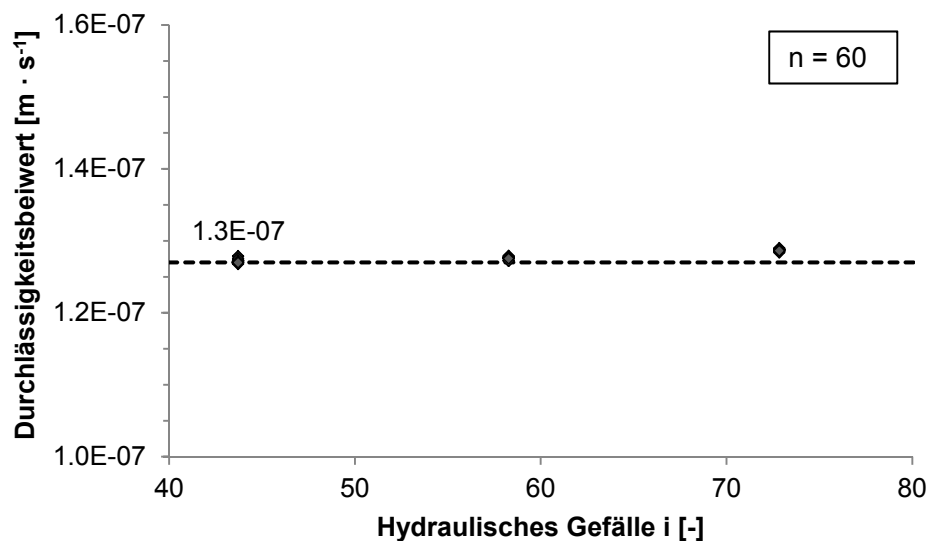


Abbildung 34: Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit dem Kalibrierungsmaterial B in Abhängigkeit vom hydraulischen Druckgefälle am Anlagentyp II. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert.

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist in obiger Grafik wiederum mit linear skalierten Achsen dargestellt, da die Werte erwartungsgemäß wenig streuen. Der mittlere Durchlässigkeitsbeiwert liegt rechnerisch bei  $1,27 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Eine weitere Darstellung der Ergebnisse ist der Abbildung 35 zu entnehmen.

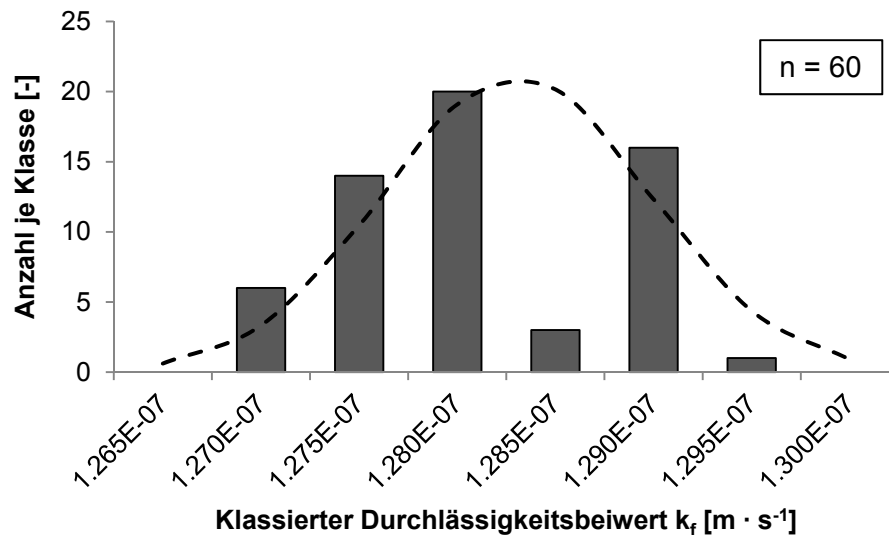


Abbildung 35: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial B am Anlagentyp II. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz.

Die rechnerisch ermittelten Durchlässigkeiten auf die dritte Nachkommastelle, dienen auch hier lediglich der Visualisierung der Streuung.

### 5.2.2.3. Anlagentyp III

Anlagentyp III besteht aus einem Vorhaltebehälter, welcher in einer variablen Höhe fixiert werden kann. Mittels einer Überlaufvorrichtung wird der Wasserstand in dem Vorhaltebehälter auf einem konstanten Niveau gehalten, wodurch ein definierter Wasserdruck an die Messzelle angeschlossen werden kann. Am Auslass der Messzelle kann das Prüfwasser druckfrei abfließen, wo es mit Auffanggefäßen erfasst wird. Die Messung des Druckgefälles wird dabei über die Messung des Höhenunterschiedes zwischen konstantem Wasserspiegel im Vorratsbehälter und dem druckfreien Auslass realisiert. Wie auch bei den vorigen Anlagentypen kann der Seitendruck über einen mit Druck beaufschlagten Vorhaltebehälter aufgebracht werden. Der schematische Aufbau kann der Abbildung 36 entnommen werden.

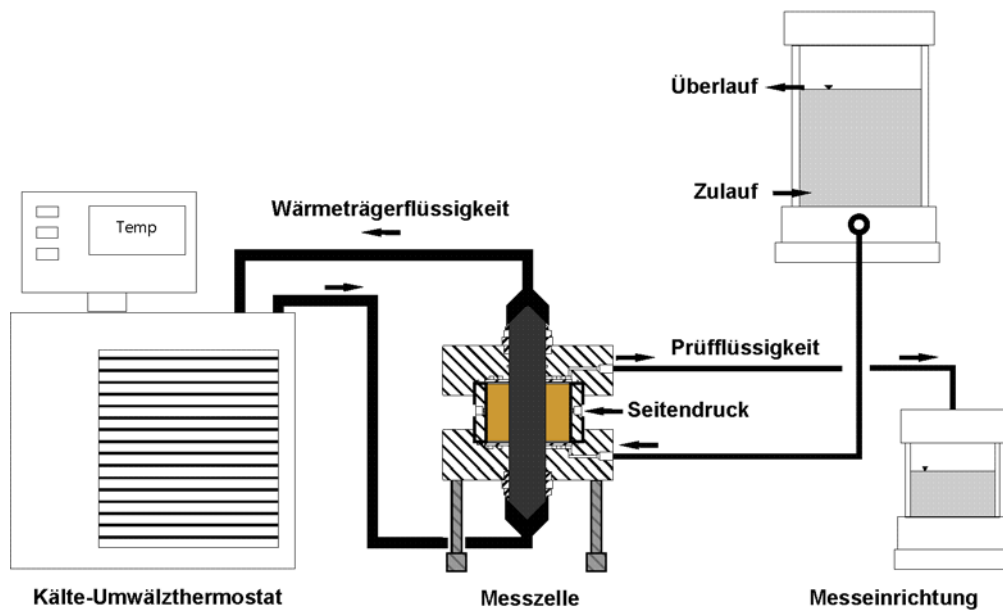


Abbildung 36: Schematischer Aufbau des Anlagentyps III für die Durchführung von Frost-Tau-Wechselversuchen

Auch an diesem Aufbau wurden Kalibrierungsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse werden in den folgenden Grafiken dargestellt und bewertet. In der Abbildung 37 werden die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit dem Kalibrierungsmaterial A dargestellt. Die 115 Versuche wurden dabei mit unterschiedlichen hydraulischen Druckgefällen durchgeführt, um zu überprüfen, ob die direkte Proportionalität von Fließgeschwindigkeit und hydraulischem Gefälle (6) gegeben ist.

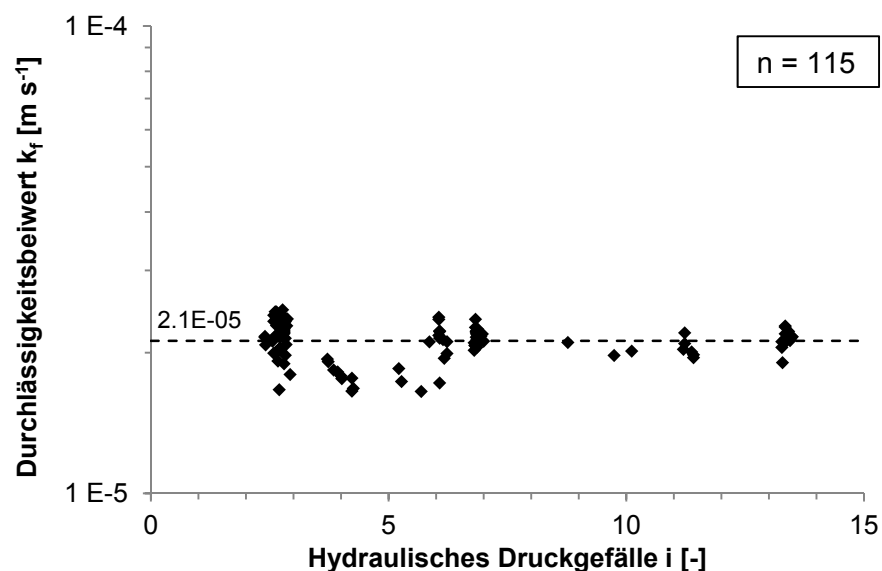


Abbildung 37: Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit dem Kalibrierungsmaterial A in Abhängigkeit vom hydraulischen Druckgefälle am Anlagentyp III. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert.

Es ist aus der obigen Abbildung 37 zu erkennen, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte unabhängig vom anliegenden hydraulischen Gefälle sind. Dies bestätigt die Annahme, dass ein linearer Ansatz für die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes angewendet werden muss. Die Ergebnisse der Untersuchungsreihe entsprechen den Voraussetzungen der DIN 18130-1 [1998] und unterliegen den natürlichen Schwankungen, wie in Abbildung 38 dargestellt.

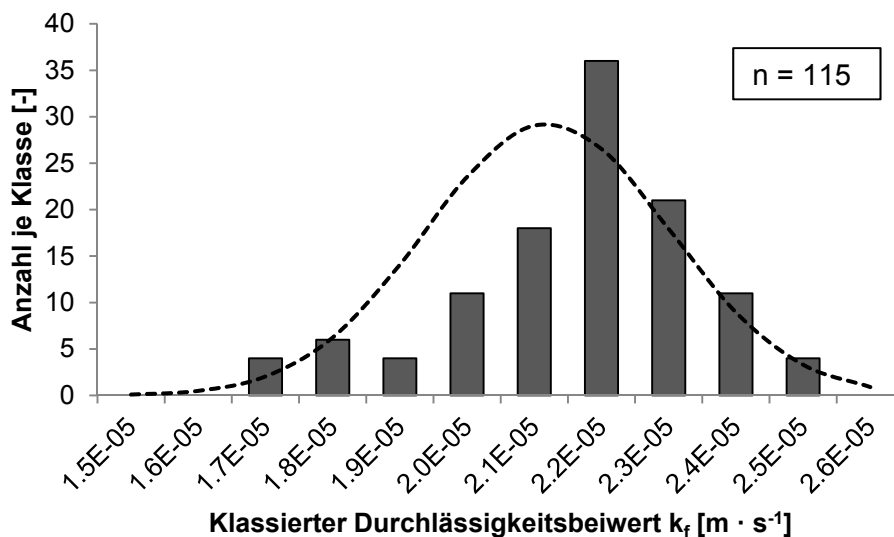


Abbildung 38: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial A am Anlagentyp III. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz.

Unter Einbeziehung der gesamten Messergebnisse, ergibt sich ein mittlerer  $k_f$ -Wert von  $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Die Ergebnisse der Messungen mit dem Kalibrierungsmaterial B sind in Abbildung 39 aufgetragen.



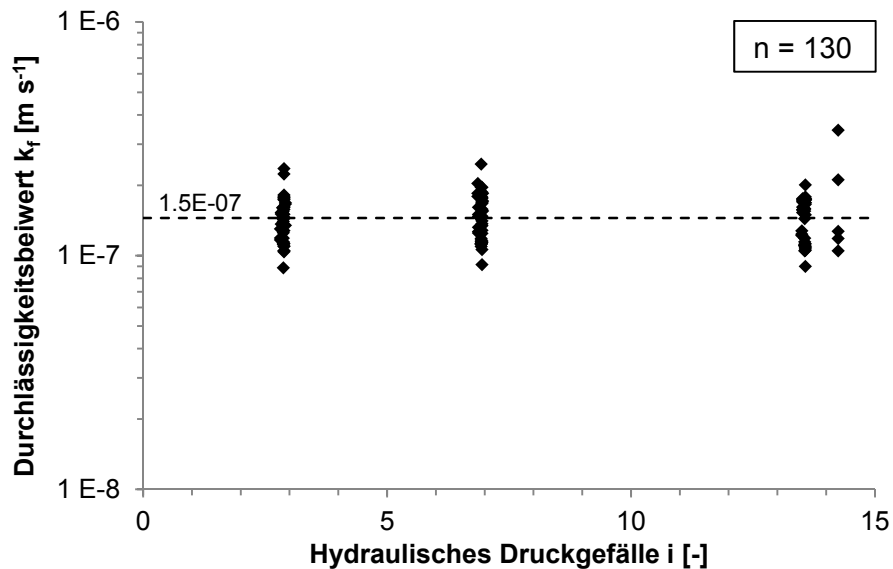


Abbildung 39: Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit Quarzmehl in Abhängigkeit vom hydraulischen Druckgefälle am Anlagentyp III. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert.

Die Ergebnisse dieser Messreihe schwanken; jedoch auf einem insgesamt geringen Niveau unter Betrachtung der Rahmenbedingungen des ASTM D-5084 [2010]. Eine Auftragung der klassierten Durchlässigkeitsbeiwerte ist der Abbildung 40 zu entnehmen.

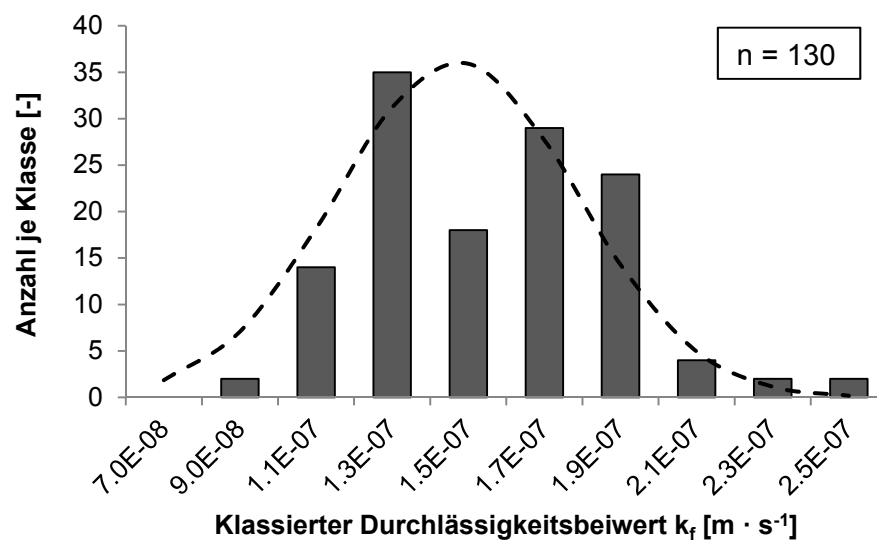


Abbildung 40: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial B am Anlagentyp III. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz.

Es ist ersichtlich, dass das Gros der Messwerte in einem Durchlässigkeitsbereich zwischen  $1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $1,9 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  liegen. Die Verteilung ähnelt dabei der einer Normalverteilung, welche als gestrichelte Linie in der Grafik dargestellt ist.

### 5.2.3 Vergleich und Interpretation der Kalibrierungsversuche

Die Ergebnisse der Kalibrierungsversuche wurden vergleichend gegenübergestellt. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der beiden Materialien an jeder der drei Anlagentypen können der Abbildung 41 entnommen werden. Weiterhin ist darin eine aufsummierte Darstellung eines jeden Materials abgebildet (bezeichnet durch  $\Sigma$ ).

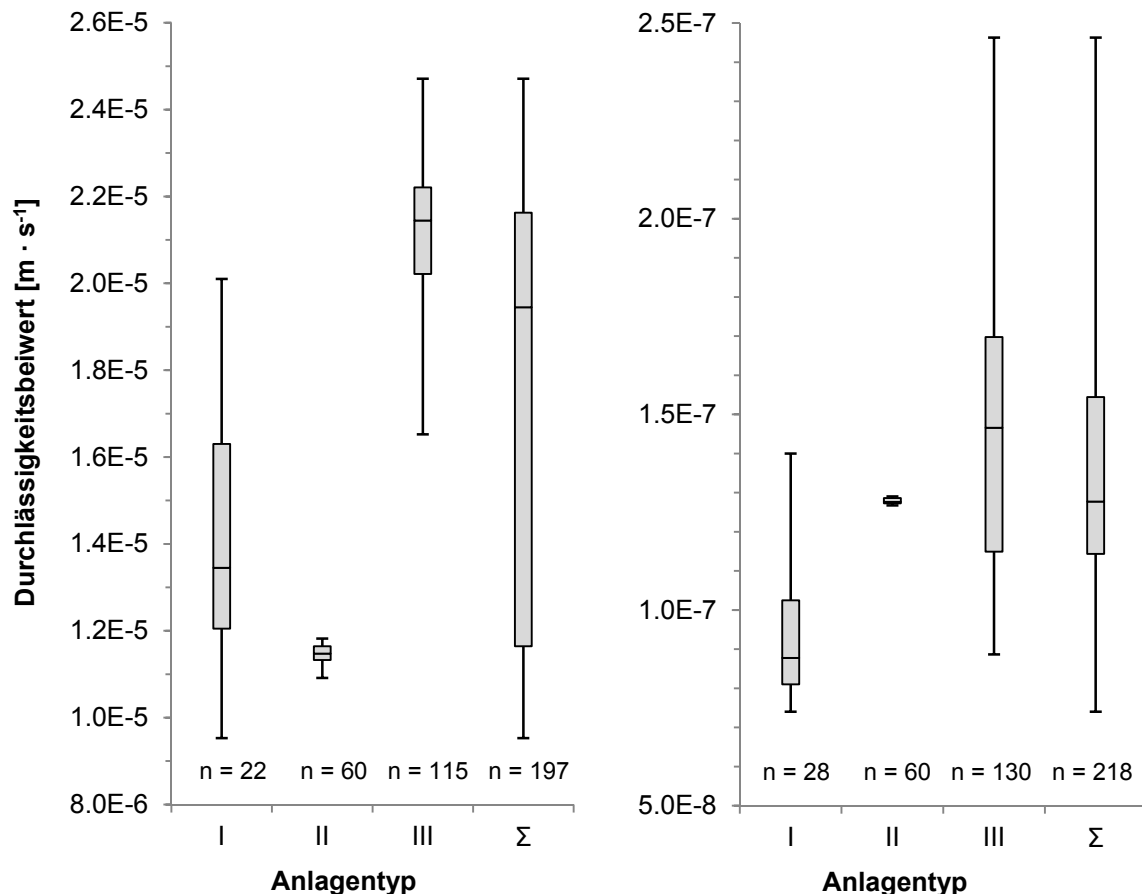


Abbildung 41: Vergleich der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte der verwendeten Kalibrierungsmaterialien A (links) und B (rechts) an den unterschiedlichen Anlagentypen I bis III, sowie Gesamtdarstellungen der Versuche.

Die ermittelten Durchlässigkeitswerte der beiden Kalibrierungsmaterialien liegen in dem Bereich, welcher in Kap 5.2.1 über die Korngrößen abgeschätzt wurde. Eine Gegenüberstellung der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte und deren Streumaße ist in Tabelle 10 dargestellt.

Die Variationskoeffizienten der Gesamtdarstellungen weisen mit Werten  $< 0,3$  eine hohe Güte der Messung nach. Damit liegen die Ergebnisse in dem Streubereich der Ringversuche des RR:D18-D1018, einer Studie der ASTM zum Abgleich möglicher Methoden zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit [ASTM D-5084 2010]. Den

Ergebnissen der Kalibrierungsversuche folgend, kann davon ausgegangen werden, dass das Prüfverfahren standortunabhängig anwendbar ist.

*Tabelle 10: Gegenüberstellung der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte der Kalibrierungsversuche an den drei Anlagentypen und insgesamt.*

Parameter	I	II	III	Gesamt
<i>Kalibrierungsmaterial A</i>				
$\overline{k_f}$ [m · s <sup>-1</sup> ]	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
VC [-]	0,20	0,02	0,09	0,28
n [-]	22	60	115	197
<i>Kalibrierungsmaterial B</i>				
$\overline{k_f}$ [m · s <sup>-1</sup> ]	$9,3 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
VC [-]	0,19	0,01	0,22	0,23
n [-]	28	60	130	218

Die Ergebnisse der drei unterschiedlichen Versuchsaufbauten, welche sich ebenfalls an unterschiedlichen Standorten befanden, zeigen, dass mit den Messzellen bei Versuchen an vergleichbaren Materialien auch vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

Bei den Betrachtungen gilt es zu beachten, dass die Messungen mit Fehlern behaftet sind. Der Fehler einer jeden Messung hängt maßgeblich von zwei Faktoren ab: der Genauigkeit der verwendeten Messgeräte und der Kompetenz des Laborpersonals.

Allgemein kann der maximal mögliche Fehler einer Funktion mehrerer Variablen über das totale Differential berechnet werden [Papula 2009].

$$\Omega_{f(x_i)} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Omega_{x_i} \quad (19)$$

Mit

$\Omega_{f(x_i)}$  = Maximaler Fehler [-]

$\Omega_{x_i}$  = Fehlerwert der einzelnen Variablen [-]

In dem Fall einer Durchlässigkeitsberechnung nach Gleichung (11) errechnet sich der maximale Fehler zu

$$\Omega_k = \frac{\partial k}{\partial V} \Omega_{\Delta V} + \frac{\partial k}{\partial l} \Omega_l + \frac{\partial k}{\partial \alpha_T} \Omega_{\alpha_T} + \frac{\partial k}{\partial A_{Modell}} \Omega_{A_{Modell}} + \frac{\partial k}{\partial h} \Omega_{\Delta h} + \frac{\partial k}{\partial t} \Delta t \quad (20)$$

Mit

$\Omega_k$  = Maximaler Fehlerwert der Messung [-]

Der relative Fehler einer Messung errechnet sich nach Gleichung (21).

$$\Omega_{rel} = \frac{\Omega_k}{k_f} \quad (21)$$

Mit

$\Omega_{rel}$  = Relativer Fehler einer Messung [-]

Typischerweise hat bei Durchlässigkeitsmessungen die Genauigkeit der messtechnischen Erfassung des Volumenstroms den größten Einfluss auf den absoluten Fehler. Bei den meisten Anlagen wird der Volumenstrom nicht direkt gemessen, sondern über eine Erfassung eines Probevolumens der Prüfflüssigkeit über ein Zeitintervall [DIN 18130 1998, ASTM D-5084 2010]. In der Abbildung 42 ist exemplarisch der Einfluss der Zeitschritt- und der Volumengröße auf den relativen Fehler des Anlagentyps I dargestellt. Dabei wurden anhand exemplarischer Durchlässigkeiten die einzelnen Kurven berechnet und auf eine logarithmische Durchlässigkeitskala aufgetragen. Die weiteren Einflussparameter wurden für die Darstellung mit einem konstanten Wert angenommen.

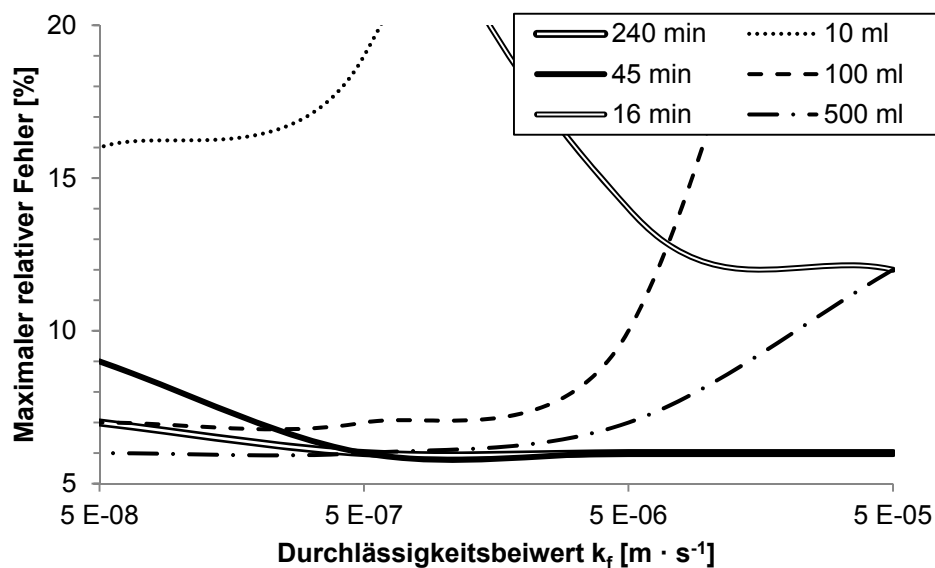


Abbildung 42: Einfluss der Zeitschritt- und Messvolumengröße auf den relativen Fehler der Durchlässigkeitsbeiwertermittlung am Anlagentyp I. Exemplarische Darstellung definierte Konfigurationen über den relevanten Durchlässigkeitsbereich der Kalibrierungsversuche.

Es ist ersichtlich, dass der relative Fehler bei einer geschickten Wahl der Messvolumina und korrespondierenden Zeitintervallen auf einem niedrigen Niveau im Bereich von sechs Prozent gehalten werden kann. Ein unsachgemäßes Messverhalten führt zu großen Fehlern, wodurch eine Interpretation der Ergebnisse unmöglich wird. Daher ist die

Kompetenz des Laborpersonals bei der Interpretation der Messergebnisse stets mit einzubeziehen.

Für die vorliegende Betrachtung wurden konservative Fehlerwerte für die einzelnen Messgrößen angenommen, so dass bei den errechneten Fehlerwerten von *worst case* Werten ausgegangen werden kann.

*Tabelle 11: Unsicherheiten der Messgrößen je Anlagentyp und relative Fehler der maßgeblichen Durchlässigkeitsbereiche.*

Messunsicherheit	Anlagentyp I	Anlagentyp II	Anlagentyp III
$\Delta V$ [ml]	1,0	0,5	0,5
$l$ [mm]	1	1	1
$\alpha_T$ [-]	0,01	0,01	0,01
$A_{Modell}$ [mm <sup>2</sup> ]	100	100	100
$\Delta h$ [mm]	50	100	10
$\Delta t$ [s]	5	5	5
$\Omega_{rel}$ (bei $1 \cdot 10^{-5}$ ) [m · s <sup>-1</sup> ]	0,09	0,10	0,07
$\Omega_{rel}$ (bei $1 \cdot 10^{-7}$ ) [m · s <sup>-1</sup> ]	0,10	0,06	0,07

Aus obiger Tabelle ist zu entnehmen, dass die Messfehler der einzelnen Anlagentypen in dem verwendeten Durchlässigkeitsbereichen auf einem niedrigen Niveau von  $\leq 10\%$  liegen. Bei Bedarf kann dieser Fehler durch weitere Maßnahmen noch reduziert werden, was i.d.R. mit einem deutlich erhöhten Aufwand verbunden ist. Die aufgelisteten Werte sind in dem alltagstauglichen Laborablauf entnommen und stellen damit die gute Praxis dar. Unter Betrachtung der Messunsicherheit in Kombination mit der Streuung der Messungen, kann davon ausgegangen werden, dass die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte der Kalibrierungsmaterialien charakteristisch sind. Es ist davon auszugehen, dass mit dem entwickelten Verfahren eine standortunabhängige Bewertung der Systemdurchlässigkeiten möglich ist.

### 5.3 Einfluss der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel auf die Durchlässigkeit

Für die Anwendung des Prüfverfahrens ist der Einfluss der Anzahl der durchgeführten FTW-Simulationen auf das zu prüfende Material von entscheidender Bedeutung. Zentraler Punkt bei dieser Betrachtung ist, ob es mit steigender Anzahl an thermischen Lastzyklen weiter zu einer Veränderung der hydraulischen Durchlässigkeit der Prüfkörper kommt.

Bisherige Untersuchungen zum Frosteinfluss auf das Hebungsverhalten und die Durchlässigkeit von feinkörnigen Böden und Deponieabdichtungen haben gezeigt, dass der maximale frost-tau-bedingte Anstieg der Durchlässigkeit sich während der ersten vier FTW einstellt [Othman et al. 1994, Benson et al. 1995a, Anbergen et al. 2012]. Die Untersuchungen von Chamberlain [1981] ergaben, dass sich nach zwei FTW die maximale Frosthebung eingestellt hat. Der ASTM Standard D-6035 [2008], welcher die hydraulische Durchlässigkeit von Böden unter FTW Einfluss beurteilt, empfiehlt die Durchführung von zehn FTW, da sich ab dort i.d.R. keine weitere Veränderung der Durchlässigkeit ausmachen lässt.

Dies gab Anlass davon auszugehen, dass sich auch bei Hinterfüllmaterialien während der ersten FTW eine mögliche Schädigung einstellt und weitere FTW keinen signifikanten Einfluss mehr haben. Erste Versuche mit Hinterfüllmaterialien haben dies bestätigt, wie in Abbildung 43 zu erkennen.

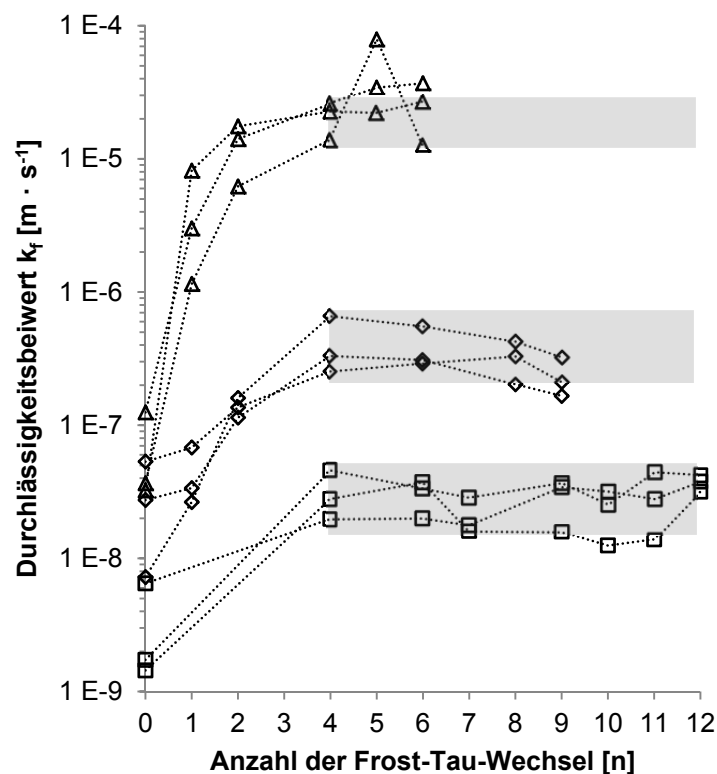


Abbildung 43: Einfluss der Anzahl der durchgeführten FTW-Simulationen auf die Durchlässigkeit. Durchlässigkeitsbeiwerte dreier Prüfserien mit je drei Prüfkörpern (gleiche Symbole). Die gepunkteten Linien markieren die Versuchsspur eines jeden Prüfkörpers. Die grauen Balken markieren den Streubereich des  $k_f$ -Wertes nach vier FTW.

Es sind drei Prüfserien mit je drei Prüfkörpern dargestellt. Die Prüfung erfolgte nach dem Prüfkonzept aus Kap 4.6. Es ist zu erkennen, dass die Durchlässigkeit nach dem vierten FTW kaum einen weiteren Anstieg verzeichnet, was den Erkenntnissen aus der Literatur entspricht [Othman et al. 1994, Benson et al. 1995a]. Demnach ist eine Aussage zum Durchlässigkeitsverhalten der Materialien unter FTW Simulationen nach einer vertretbar geringen Anzahl an FTW-Simulationen möglich, die es festzulegen gilt. Daher wird mit einem Sicherheitszuschlag von einer Mindestanzahl von sechs durchzuführenden FTW-Simulationen ausgegangen, um den FTW-Einfluss auf Hinterfüllmaterial bewerten zu können.

Um diese Erkenntnisse zu überprüfen, wurde eine Prüfserie mit einer hohen Anzahl an FTW Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse sind der Abbildung 44 zu entnehmen.

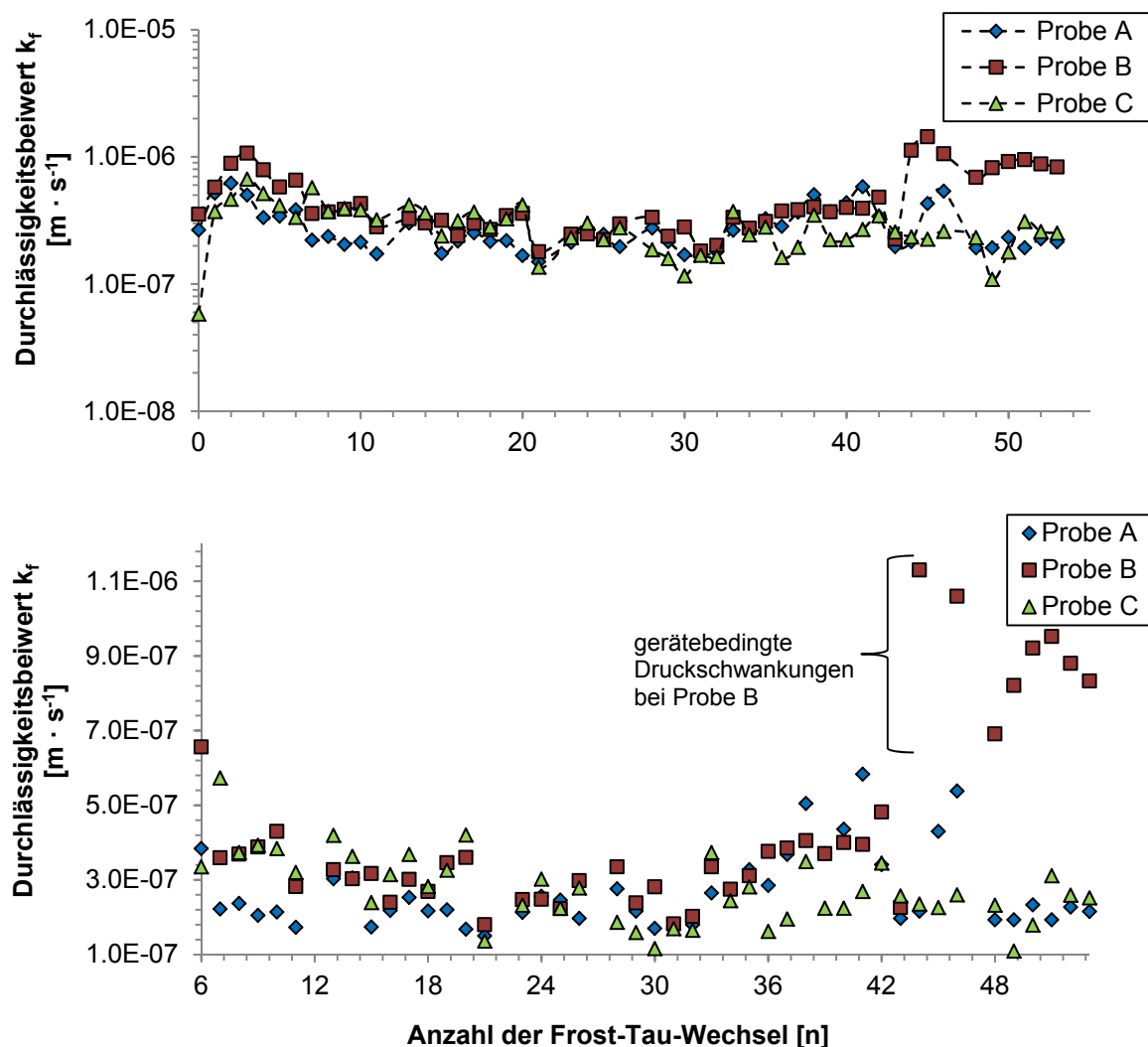


Abbildung 44: Auswertung dreier Versuche mit hoher Anzahl an FTW. Gesamtdarstellung mit gestrichelten Linien als Versuchsspur (oben), Darstellung der Ergebnisse (6 bis 53 FTW) in linearer Darstellung (unten).

Bei dem vorliegenden Experiment wurden drei Prüfkörper eines Hinterfüllbaustoffes (Bezeichnung EE nach Tabelle 17, Kap. 7.2) gemäß den Vorgaben aus Kap. 4.4 hergestellt und für 56 Tage unter in-situ Temperaturbedingungen verdunstungsgeschützt gelagert. Die Prüfkörper wurden zum Prüfzeitpunkt in die Messzellen überführt und die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit (Kap. 2.8) bestimmt. Die Versuche wurden gemäß des Prüfkonzepthes (Kap. 4.6) durchgeführt.

Aus den obigen Grafiken ist ersichtlich, dass es während der ersten FTW zu einem Anstieg der Durchlässigkeit der Prüfkörper kommt. Dieser Anstieg nimmt mit zunehmender Versuchszeit wieder leicht ab und verbleibt auf einem annähernd gleichen Niveau. Die Durchlässigkeit der Probe B steigt nach FTW Nr. 44 wieder an, jedoch nicht über den Bereich der ersten Frost-Schädigung. Bei dieser Messzelle wurden zur selben Zeit leichte Druckschwankungen festgestellt, wodurch eine eindeutige Zuordnung dieses letzten Anstieges zu den FTW Simulationen nicht möglich ist.

Bei der Auswertung gilt es zu beachten, dass während dieses gesonderten Versuches mehrere Einflüsse auf die Durchlässigkeit wirken. Zum einen gibt es einen durch die FTW verursachten Anstieg der Durchlässigkeit, welcher in dem Bereich der ersten FTW Simulationen stattfindet. Dieser scheint begrenzt zu sein, wie auch zuvor in Abbildung 43 beobachtet.

Ein weiterer gegenläufiger Einfluss ist die fortschreitende Hydratation der Zementkomponenten des geprüften Materials. Diese führt zu einer Veränderung der Form und Größe des Porenraumes und folglich zu einer Verringerung der Wasserdurchlässigkeit. Durch den ständigen Wasserkontakt kann der pH-Wert des Hinterfüllmaterials absinken und es kommt zu Carbonatisierungserscheinungen, welche mit einer Volumenzunahme verbunden sind [Schäffel 2009]. Da eine volle Wassersättigung vorliegt kann es zu keinem Carbonatisierungsschwinden durch Verdunstung kommen. Das bedeutet, dass es eher zu einem Carbonatisierungsquellen kommt und daher tendenziell zu einer Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit durch einer Verringerung des Porenraumes.

Weiterhin sind bei derart langen Versuch (über drei Monate Versuchszeit) biochemische und strömungsmechanische Prozesse zu erwarten, wie Algenwachstum, Versinterung oder auch Suffusion. Diese Prozesse sind nicht nur zeitabhängig, sondern ebenfalls von der Durchlässigkeit des Materials, der Beschaffenheit, sowie der absoluten Menge an durchströmendem Wasser abhängig.



Bei dem hier geprüften Material über die Versuchszeit ist der Einfluss dieser Randeffekte verhältnismäßig gering. Dies kann der Abbildung 45 entnommen werden, in welcher die klassierten Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche abgebildet sind, welche mehr als fünf FTW-Simulationen erfahren haben. Es ist eine eindeutige Häufung der Messwerte in dem Bereich um  $3 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  zu erkennen. Es ist weder eine stetig ansteigende, noch absteigende Tendenz zu erkennen. Damit wird die These belegt, dass die Schädigung während der ersten FTW eintritt und keine Schädigung durch weitere FTW-Belastungen entsteht. Demnach ist es richtig anzunehmen, dass eine verhältnismäßig geringe Anzahl an FTW ausreicht, um das Materialverhalten bzgl. des FTW-Widerstandes zu charakterisieren.

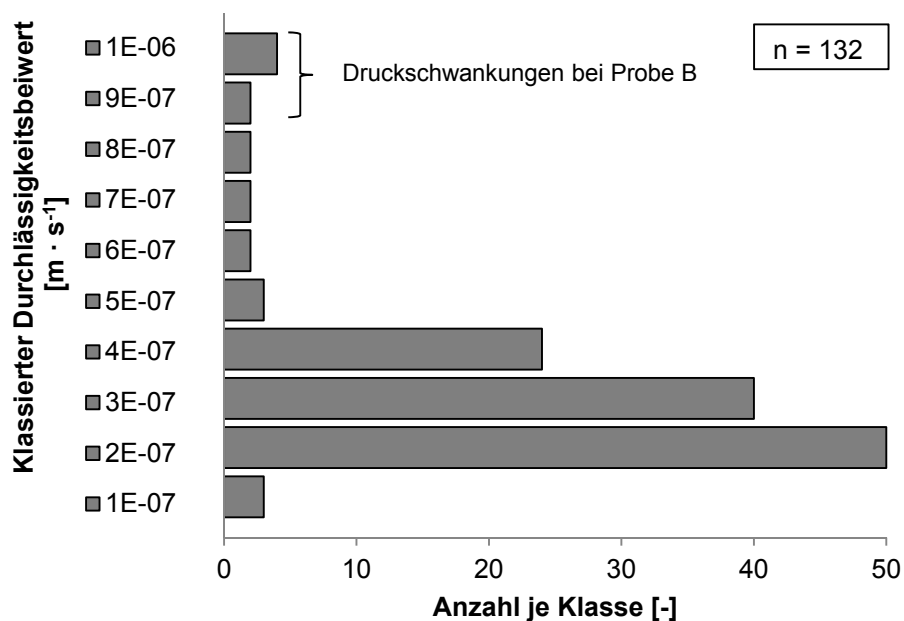


Abbildung 45: Klassierte Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit mehr als 5 Frost-Tau-Belastungen.

Die Streuung der einzelnen Prüfkörper der Versuchsreihe mit hoher Anzahl and FTW-Simulationen ist gering. Der mittlere Variationskoeffizient von 0,29 bestätigt das vergleichbare Durchlässigkeitsverhalten der drei Prüfkörper. Dabei wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte je nach der gleichen Anzahl an FTW-Simulationen verglichen. Die Verteilung der Variationskoeffizienten der Messreihe sind in Abbildung 46 dargestellt.

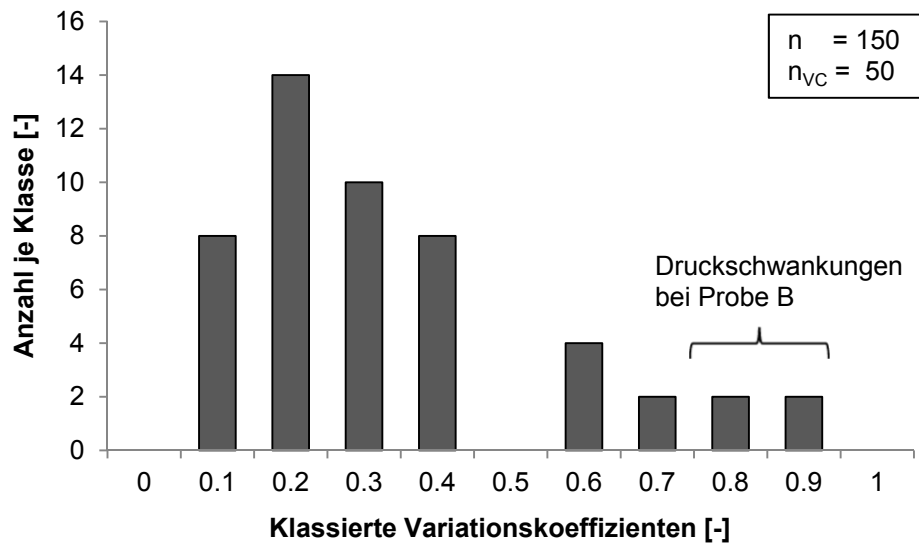


Abbildung 46: Verteilung der Variationskoeffizienten der jeweiligen Dreifachbestimmung (Prüfkörper A,B,C) über den gesamten Langzeitversuch mit 53 FTW.

Trotz der erhöhten Streuung aufgrund der Druckschwankungen bei Probe B, sind die Variationskoeffizienten auf einem tendenziell niedrigen Niveau im Vergleich zu regulären Durchlässigkeitsmessungen nach ASTM D-5084 [2010]. Da die Durchlässigkeitsbeiwerte stets positive Zahlenwerte annehmen und folglich auch die Variationskoeffizienten positiv sind, wurde die Verteilung der Variationskoeffizienten mit zu einer logarithmischen Normalverteilung verglichen. Der dazugehörige p-p-Plot, welcher die ideale kumulative Verteilung einer Log.-Normalverteilung zu der vorliegenden Verteilung darstellt, ist in Abbildung 47 dargestellt.

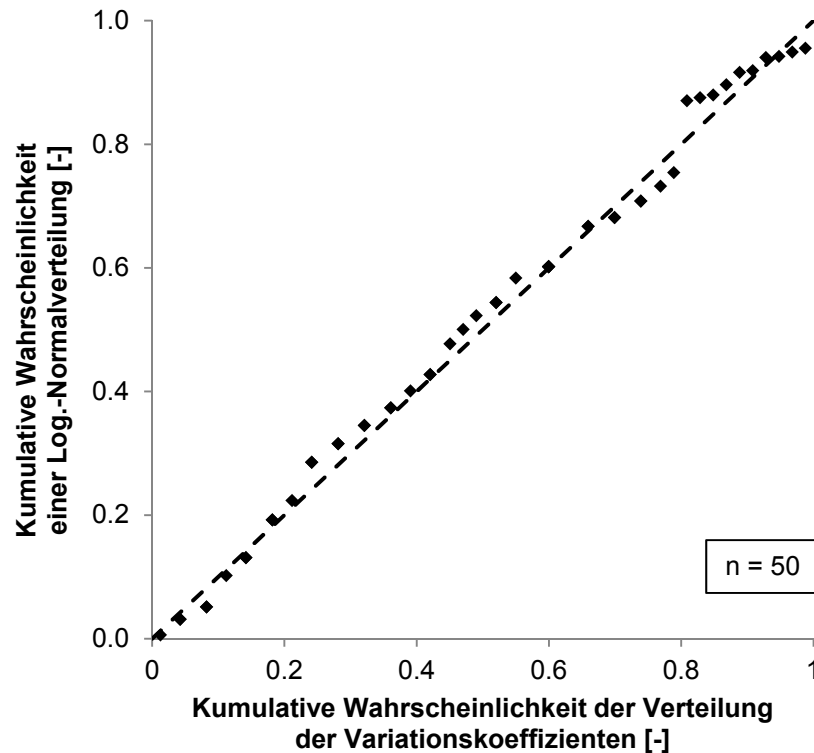


Abbildung 47: p-p-Plot der Verteilung der Variationskoeffizienten des Langzeitversuches. Die gestrichelte Linie markiert dabei den Idealfall einer vollen Übereinstimmung.

Es ist zu erkennen, dass die Verteilung der Variationskoeffizienten der einer Log.-Normalverteilung ähnelt und damit den typischen statistischen Schwankungen unterliegt. Es ist davon auszugehen, dass es sich bei den Ergebnissen und den Streuungen der einzelnen Messungen um ein charakteristisches Verhalten handelt. Dieses würde bei einem anderen Hinterfüllmaterial zwar auf einem anderen Durchlässigkeitsniveau liegen, es ist jedoch davon auszugehen, dass die Charakteristik der Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Zyklen korrespondiert.

Aus den Ergebnissen des Langzeitversuches kann geschlossen werden, dass der durch FTW hervorgerufene Anstieg der Durchlässigkeit während der ersten FTW stattfindet. Die folgenden Durchfrostungen haben keinen signifikanten Einfluss auf die Durchlässigkeit, so dass eine Prüfung für die vorliegende Arbeit auf sechs FTW begrenzt wird.

## 5.4 Versuche an Einzelkomponenten von Hinterfüllbaustoffen

Feinkörnige Böden und Tone allgemein, werden aus der rein bodenmechanischen Betrachtung als nicht frostsicher eingestuft [Konrad & Morgenstern 1980, Jessberger & Jagow-Klaff 1996]. Diese Aussagen sind jedoch von dem Anwendungsfall abhängig und können daher nicht pauschalisiert werden. Der Fokus bei den meisten bautechnischen

Untersuchungen in Bezug auf die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Böden, liegt in der straßenbaulichen oder deponietechnischen Anwendung. Aus einer tragwerksplanerischen Perspektive ist das Frost-Tau-Hebungs- bzw. Setzungsverhalten von entscheidender Bedeutung. Dabei sind feinkörnige Böden i.d.R. deutlich setzungsempfindlicher, als grobkörnige [Chamberlain 1981, Jessberger & Jagow-Klaff 1996, Unold 2006]. Da in der vorliegenden Untersuchung die Setzungsempfindlichkeit nicht im Fokus steht, sondern die hydraulische Durchlässigkeit, sind diese Grundaussagen für die hier behandelte Fragestellung nicht relevant.

Untersuchungen von Othman & Benson [1993, 1994], Othman et al. [1994], Benson et al. [1995b] und Chamberlain et al. [1997] haben den Einfluss von zyklischen FTW auf die hydraulische Durchlässigkeit von tonigen Abdeckungen für den Deponiebau evaluiert. So konnte geschlossen werden, dass es zwar durch die FTW zu einem Anstieg der Durchlässigkeit kommt, jedoch tonige Abdeckungen existieren, welche trotzdem als geeignet eingestuft werden können. Ähnliches wurde bei den Untersuchungen über das FTW-Verhalten von Abdeckschichten von Moo-Young & Zimmie [1996] beobachtet. Bei den beschriebenen Untersuchungen wurde jedoch ein- und dreidimensionales Durchfrostern angewandt, was für den vorliegenden Anwendungsfall nicht zutreffend ist (Kap. 4.1.4). Analoges gilt für die Prüfrichtung der hydraulischen Durchlässigkeit, welche i.d.R. orthogonal zu den entstandenen Eislinsen gerichtet war.

Um das Materialverhalten von Tonen bei dem Einsatz als Hinterfüllung für EWS zu bewerten, wurde ein Versuch an drei Proben einer reinen Tonsuspension in der entwickelten Messzelle realisiert. Der Versuch wurde mit einem Calcium-Bentonit durchgeführt. Das Produkt ist für die Herstellung von Dicht- und Schmalwänden ausgelegt. Das Material wurde in einem Wasser-/Feststoffwert von 1,5 angemacht, nach den Anmachvorgaben aus Kap. 4.4, jedoch mit einem Verzicht auf eine Abbindezeit, da es sich um kein zementgebundenes Material handelt. Die Suspension konnte vor dem Gießen 15 Minuten quellen und wurde anschließend direkt in die Messzellen gefüllt.

Die Ergebnisse sind der Abbildung 48 zu entnehmen.

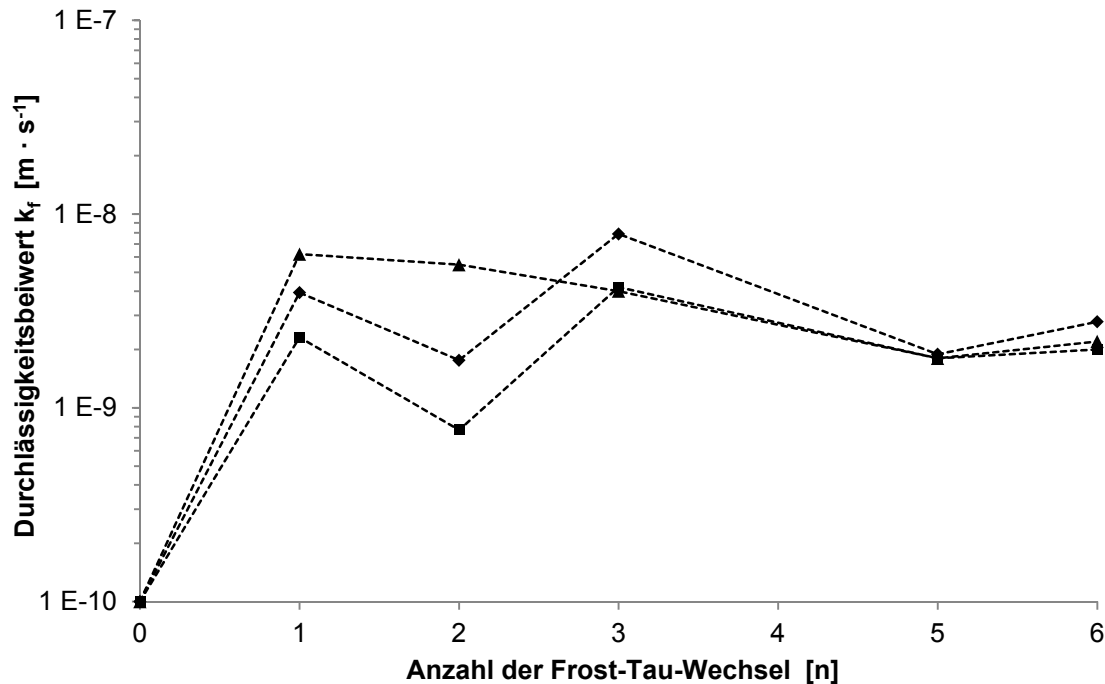


Abbildung 48: Ergebnis der Versuche mit Calcium-Bentonit (3 Prüfkörper). Die Werte vor dem ersten Frost-Tau-Wechsel sind als Richtwerte zu verstehen, nach dem vierten FTW erfolgte keine Durchlässigkeitsmessung. Die gestrichelten Linien markieren die Versuchsspuren.

Es ist zu erkennen, dass es nach dem ersten FTW zu keinem weiteren Anstieg der Wasserdurchlässigkeit kommt. Korrespondierende Ergebnisse wurden von Paudel & Wang [2010] an befrosten Tonprüfkörpern beobachtet, welche jedoch eindimensional befrosten wurden. Da die Messung vor dem ersten FTW mit einer hohen Unsicherheit behaftet ist, sind die Werte als Richtwerte zu verstehen, welche lediglich die Größenordnung angeben. Es ist jedoch ersichtlich, dass der Anstieg der Durchlässigkeit in einem Bereich von mindestens einer Zehnerpotenz liegt und damit die Beobachtungen von Othman et al. [1994] und Benson et al. [1995b] bestätigt.

Weiterhin ist die absolute Durchlässigkeit der Prüfkörper auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Dies zeigt, dass reine Tonhinterfüllungen unter dem Aspekt der Systemdurchlässigkeit für das Hinterfüllen geeignet wären. Dabei gilt es jedoch andere Materialanforderungen wie Erosionsstabilität, Ortsbeständigkeit oder chemische Beständigkeit genauer zu betrachten, worauf hier nicht weiter eingegangen wird. Jedoch sind pauschale Aussagen bezüglich einer Nichteignung von reinen Tonen für den Einsatz unter FTW Einflüssen, nicht haltbar. Es muss stets der spezielle Anwendungsfall betrachtet werden, sowie die maßgeblichen Materialparameter.

Parallel zu dem Durchlässigkeitsversuch, wurden in Anlehnung an die Quellhebungsversuche von Frank [1983], einaxiale Kompressionsversuche mit dem Material durchgeführt, um das Quellhebungspotenzial bewertet zu können. Dazu wurden in Anlehnung an DIN 18135 [2012] drei lufttrockene Materialproben in Ödometer eingebaut, mit einem vertikalen Überlagerungsdruck von  $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$  beaufschlagt und anschließend eine beidseitige Wassersättigung ermöglicht. Dies entspricht der Versuchsanordnung eines *Pulverquellversuchs* nach Thuro [1993] mit erhöhter Auflast. Auf einen geringeren Überlagerungsdruck als  $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$  wurde aus laborablauftechnischen Gründen verzichtet.

Es wurde die einaxiale Hebung in Abhängigkeit der Zeit erfasst. In dem Ödometerring für die Messung wird eine radiale Ausdehnung des Materials verhindert, so dass es zu einem eindimensionalen Hebungsvorgang kommt. Weiterhin werden bei der Versuchsanordnung mögliche Wandreibungseffekte nicht berücksichtigt, welche bei der vorliegenden Anwendung wie eine zusätzliche Last wirken können. Damit sind die ermittelten Werte als konservative Minimalwerte zu verstehen. Die Ablesegenauigkeit der Messeinrichtung beträgt 0,1 mm, bei einer minutengenauen Ablesung.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 49 mit einer logarithmischen Zeitskala dargestellt.

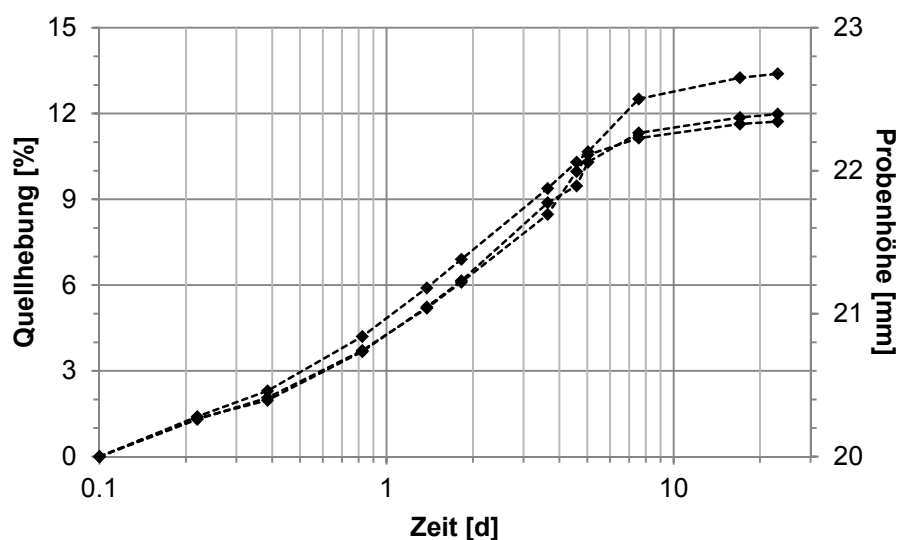


Abbildung 49: Quellhebungsversuch an einem reinen Calcium-Bentonit. Dreifachversuch mit einer Anfangshöhe von 20 mm und einer konstanten Auflast von  $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ . Die gestrichelten Linien markieren die Versuchspur.

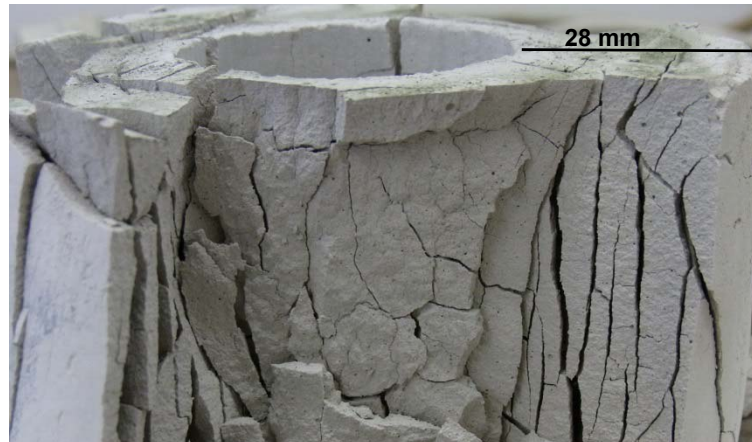
Es ist ersichtlich, dass es trotz einer vertikalen Auflast von  $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$  zu Quellhebungen kommt. Demnach ist, bei der gewählten Auflast, von einem Quelldruck größer  $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$  auszugehen. Da die Quellhebung jedoch mit einem Wert im Bereich von einem Zehntel der Anfangshöhe verhältnismäßig gering ist, ist von einem gesamten Quelldruck in der Größenordnung der Auflast auszugehen.

Der bei der Durchführung des Durchlässigkeitsversuches angewandte Seitendruck von bis zu maximal  $50 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$  liegt somit in einem ähnlichen Bereich wie die Auflast während des Quellversuches. Da jedoch kein lufttrockenes Material, sondern eine Suspension in die Messzellen gefüllt wurden, ist eine Deformation der Probe aufgrund des Seitendrucks unausweichlich. Bei der Versuchsdurchführung muss dieses Materialverhalten berücksichtigt werden und in die Auswertung mit einfließen. Trotz dieser Deformation kann geschlussfolgert werden, dass die Systemdurchlässigkeit von Prüfkörpern einer reinen Bentonithinterfüllung ermittelt werden kann, sowohl vor als auch nach einer Belastung durch FTW. Hierzu muss das Seitendruckniveau dementsprechend angepasst werden.

Weiterhin wurde ein Pilotversuch an einem thermisch verbesserten Pellethinterfüllbaustoff durchgeführt. Der Pelletbaustoff wurde trocken in die Messzelle gefüllt und die Wasserzugabe erfolgte erst bei geschlossener Messzelle. Der Prüfkörper wies sowohl vor als auch nach bis zu sieben FTW Durchlässigkeiten von unter  $1 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  auf. Es konnte keine signifikante Änderung der Durchlässigkeit ermittelt werden. Folglich ist der Baustoff unter den Gesichtspunkten der FTW-Widerstandsfähigkeit als grundsätzlich geeignet zu bewerten. Weiterhin war bei den angewendeten Versuchsdrücken die Form- und Erosionsstabilität gegeben. Die Möglichkeit der Prüfung von Pellethinterfüllbaustoffen mit dem Prüfverfahren wurde damit bestätigt.

Die nach VDI 4640-2 [2001] empfohlenen Baustellenmischungen wurden bei früheren FTW-Untersuchungen [u.a. Müller 2004, 2007] als wenig frostwiderstandsfähig bewertet und immer weiter vom Markt verdrängt. Für die Reproduzierbarkeit der Untersuchung ist es notwendig eine weitestgehend gleichbleibende Qualität und gleichbleibende Komponenten des Hinterfüllmaterials zu haben. Dies ist bei den Baustellenmischungen i.d.R. schwer realisierbar. Daher standen bei den untersuchten Produkten die Fertigmischungen im Fokus. So wurde in einem weiteren Sonderversuch ein hydraulisches Bindemittel geprüft (Bezeichnung EG nach Tabelle 17). Für den Sonderversuch, wurden zwei Prüfkörper aus einem handelsüblichen Füllbaustoff aus dem Brunnenbau durch einen FTW belastet, ausgebaut und anschließend visuell begutachtet. Der Füllbaustoff wurde häufig für die Hinterfüllung von EWS deutschlandweit eingesetzt.

Das Rissbild kann der Abbildung 50 entnommen werden, wie auch der Abbildung 17 (rechts).



*Abbildung 50: Prüfkörper nach einem FTW in der entwickelten Messzelle und anschließender Trocknung. Das Hinterfüllmaterial (Bezeichnung EG) enthält weder thermisch verbessernde Zusätze noch quellfähige Tonanteile. Die achsenparallelen Rissstrukturen sind präferierte Fließwege [Anbergen et al., 2011a].*

Es ist ersichtlich, dass die FTW Belastung in dem abgebildeten Prüfkörper zu starken Gefügeveränderungen geführt hat. Die achsenparallelen Rissstrukturen stimmen mit dem typischen Eislinnenwachstum orthogonal zum Temperaturgradienten überein und stellen präferierte Wasserwegigkeiten dar.

Mit den vorliegenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Prüfverfahren grundsätzlich geeignet ist die üblichen Hinterfüllmaterialien und deren Einzelkomponenten zu prüfen. Über das Prüfverfahren sind anwendungsbezogene Aussagen bezüglich des Durchlässigkeitsverhaltens nach FTW Belastungen möglich.

## **5.5 Visualisierung der Fließwege**

### **5.5.1 Farbtracer**

Für die Visualisierung der bevorzugten Fließwege in den Prüfkörpern wurde ein im Handel frei verfügbares Färbemittel verwendet. Dabei handelte es sich um ein rotes Textilfärbemittel mit Salzzusätzen, welches auf einer Mischung aus Säure- und Direktfarbstoffen [Simplicol 2014] basiert. Damit ist das Färbemittel in der Lage sowohl polare, als auch unpolare Texturen einzufärben. Dadurch eignet sich das Mittel besonders, da es sowohl die Fließwege an dem Sondenmaterial, als auch in dem Hinterfüllmaterial einfärben kann.



### 5.5.2 Versuchskonzept der Farbtracer Untersuchung

Zur Vorbereitung der Versuche, wurde das Textilfärbesalz mit Wasser in einem Mischungsverhältnis von 50 g Färbesalz zu 200 g Wasser angemacht, so dass die Flüssigkeit einen dunkelroten Farbton aufwies. Diese Flüssigkeit, ohne die Salzurückstände, wurde anschließend in den Zulaufbehälter für den Durchlässigkeitstest gegeben. Mit der Tracerflüssigkeit wurde, wie auch in den zuvor durchgeführten Untersuchungen, ein Durchlässigkeitsversuch in Anlehnung an DIN 18130-1 [1998] durchgeführt. Dabei wurden, bis auf die Prüfflüssigkeit, alle Versuchsrandbedingungen konstant gehalten. Der Versuch wurde mindestens solange durchgeführt, bis der Farbtracer in dem Rücklaufbehälter angelangte. Im Anschluss wurden die jeweiligen Prüfkörper aus der Messapparatur entfernt und begutachtet.

### 5.5.3 Versuchsergebnisse der Farbtracer Untersuchung

Der Tracerversuch wurde an einem Prüfkörper der Langzeituntersuchung aus Kap. 5.3 durchgeführt. Dabei handelt es sich um Probe C. Die Systemdurchlässigkeit der Probe liegt in einem Bereich zwischen  $2 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $3 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Damit liegt die Systemdurchlässigkeit im schwach durchlässigen Bereich. Der Prüfkörper wurde nach dem Tracerversuch ausgebaut und aufgesägt (Abbildung 51).

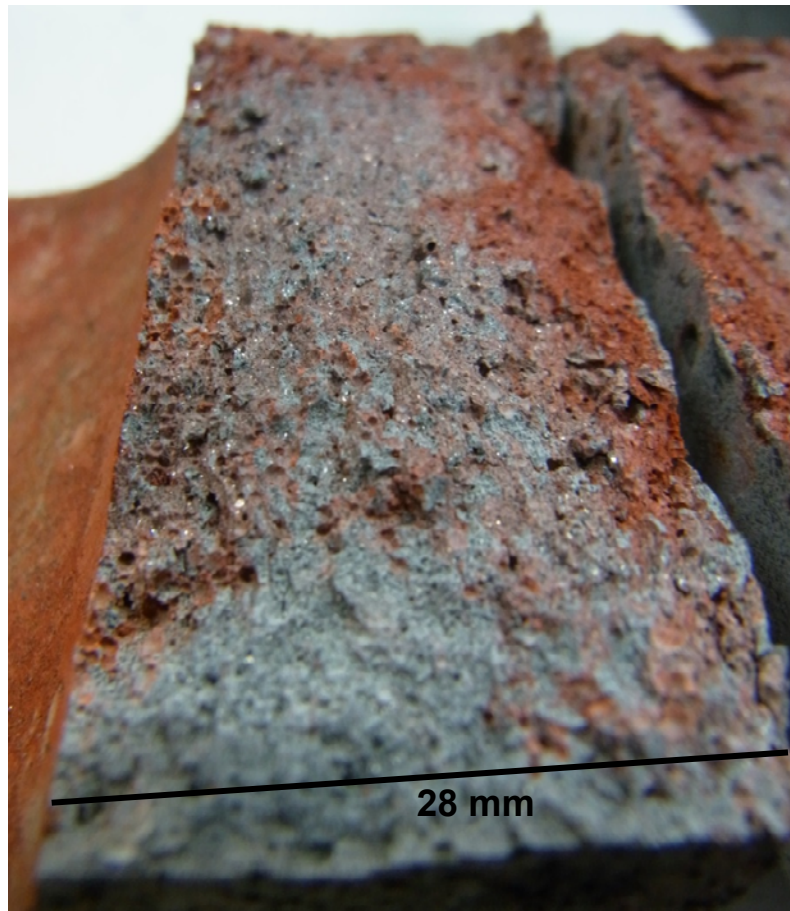


*Abbildung 51: Aufgesägter Prüfkörper nach 53 FTW-Belastungen und anschließendem Tracerversuch. Die eingefärbten Strukturen der Bruchfläche (Bildmitte) markieren die präferierten Fließwege des Wassers. Die Schnittfläche (linker, respektive rechter Rand) wurde durch den Sägeprozess so gestört, dass hier keine Einfärbungen zu erkennen sind.*

Aufgrund der Profilstörung des Sägeprozesses sind in der Schnittfläche keine Aussagen zu hydraulischen Vorgängen in der Struktur möglich, jedoch an den Bruchflächen, die nicht durch Werkzeug berührt wurden.

Der Tracerversuch zeigt zum einen eine präferierte Fließfläche an dem Kontakt vom Sondenmaterial zu dem Hinterfüllbaustoff und zum anderen in dem Hinterfüllmaterial selbst. Dies bestätigt die Annahmen und ersten Versuchsergebnisse, dass es aufgrund des Prüfkörperaufbaus zu einer Systemdurchlässigkeit kommt, welche höher ist als die reine Materialdurchlässigkeit des Hinterfüllbaustoffes [Allan & Philippacopoulos 1998a]. Die Ursache dafür ist der nicht kraftschlüssigen Verbund zwischen dem Sondenrohr und der Hinterfüllung. Der Ringspalt um das Sondenrohr stellt somit einen Bereich höherer Wasserdurchlässigkeit dar. Dies ist durch die starke Rotfärbung der Kontaktfläche zu erkennen. Diese Kontaktfläche stellt eindeutig den Weg des geringsten Fließwiderstandes im Prüfkörper dar.

Weiterhin sind ebenfalls Verfärbungen in der Struktur des Hinterfüllmaterials zu erkennen. Die Verfärbungen weisen auf einen Flüssigkeitstransport durch die Festkörperstruktur hin. Die Verfärbungen sind keine typischen Diffusionsverfärbungen, wodurch ein rein diffuser Färbemitteltransport ausgeschlossen werden kann. Die Verfärbungen belegen, dass der Flüssigkeitstransport auch durch den Hinterfüllkörper stattfindet und nicht ausschließlich entlang des Sondenrohres. Eine Nahaufnahme der Bruchfläche ist der Abbildung 52 zu entnehmen.



*Abbildung 52: Nahaufnahme eines aufgespaltenen Prüfkörpers 53 FTW-Belastungen und anschließendem Tracerversuch.*

Aus obiger Abbildung sind eindeutig die achsenparallelen Verfärbungen aufgrund des Wasserflusses zu erkennen. Die Färbung im aufgespaltenen Prüfkörper nimmt zum äußeren Rand zu. Demnach ist in diesem Bereich mehr Tracer durch die Struktur geflossen. Der äußere Bereich hat folglich eine höhere hydraulische Leitfähigkeit, als der innere Bereich der Struktur. Dies entspricht den beobachteten, frostbedingten Rissstrukturen mit einer Häufung zum äußeren Rand der Prüfkörper. Diese Aussage wird durch die einschlägige Literatur über Durchfrostungsprozesse von feinkörnigen Böden bestätigt [Konrad & Morgenstern 1980, Konrad & Lemieux 2005, Unold 2006].

Die Untersuchung hat gezeigt, dass bei dem untersuchten Material zum einen ein erhöhter Flüssigkeitstransport entlang des Sondenrohres existiert und zum anderen, dass es auch zu einem Transport durch das Gefüge des Hinterfüllkörpers kommt. Dieser ist in den durch FTW-Einfluss stärker geschädigten Bereichen, zum äußeren Rand hin, höher als zum inneren Rand hin. Somit ist die Erfüllung der Forderung nach einer Durchfrostung von innen nach außen eine notwendige Prüfbedingung (Kap. 4.1.4).

## 5.6 Instationäre Durchlässigkeit

Die Systemdurchlässigkeit der Prüfkörper steigt aufgrund der Frost-Tau-Beanspruchung an. So weist die Systemdurchlässigkeit direkt nach Beendigung des Auftauprozesses einen deutlich höheren Wert auf, welcher im Laufe der Durchlässigkeitsmessung wieder abnimmt. Dieser Hystereseeffekt beläuft sich bei der vorliegenden Untersuchung auf bis zu zwei Zehnerpotenzen. Ähnliche Effekte treten typischer Weise bei Durchlässigkeitsversuchen von Deponieabdeckungsmaterialien<sup>6</sup> und bei Sanden mit geringen Zugaben an quellfähigen Tonanteilen [Kézdi 1976], ähnlich Hinterfüllmaterialien. Diese hängen meist mit dem steigenden Sättigungsgrad der Prüfkörper und einem weiteren Quellen der Tonminerale zusammen.

Für den vorliegenden Fall kann jedoch keine Fortschreitende Sättigung vorliegen, da die Prüfkörper bereits vor der ersten Durchfrostung gesättigt wurden. Die FTW-Simulation findet grundsätzlich wassergesättigt statt und es wird keine Möglichkeit gegeben, dass Luft in das System eintreten kann. Weiterhin wurde dieses Verhalten bei jedem Prüfkörper direkt nach dem Auftauen beobachtet, warum eine FTW-Abhängigkeit naheliegend ist. Das normierte zeitabhängige Durchlässigkeitsverhalten wird definiert gemäß Gleichung (22).

$$H_k(t) = \frac{k(t) - k_{Ende}}{k_{Anfang} - k_{Ende}} \quad (22)$$

Mit

$H_k(t)$  = relative Durchlässigkeitshystereseeffekt zum Zeitpunkt  $t$  [-]

$k(t)$  = Systemdurchlässigkeit zum Zeitpunkt  $t$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$k_{Anfang}$  = Systemdurchlässigkeit zum Beginn der Messung [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$k_{Ende}$  = Systemdurchlässigkeit [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Dabei gilt es zu beachten, dass die ermittelten Systemdurchlässigkeiten zum Teil nicht der eigentlichen Definition nach ASTM D-5084 [2008] und DIN 18130-1 [1998] entsprechen, da es noch zu einer Veränderung der Durchlässigkeit kommt, diese also nicht stationär sind. Lediglich die ermittelte Systemdurchlässigkeit zum Ende entspricht der Definition. Jedoch ist mit obiger Berechnung eine anschauliche Auswertung der Daten möglich. Mit der Berechnung nimmt die normierte Hysterese der Anfangsdurchlässigkeit direkt zum Versuchsbeginn nach einem Auftauzyklus den Wert eins an und die Hysterese

---

<sup>6</sup> Interne Berichte der Knabe Enders Dührkop Ingenieure GmbH.

für die tatsächliche Durchlässigkeit nach DIN 18130-1 [1998] bzw. ASTM D-5084 [2010] den Wert null. In der nachfolgenden Abbildung 53 ist der Hystereseeffekt normiert dargestellt.

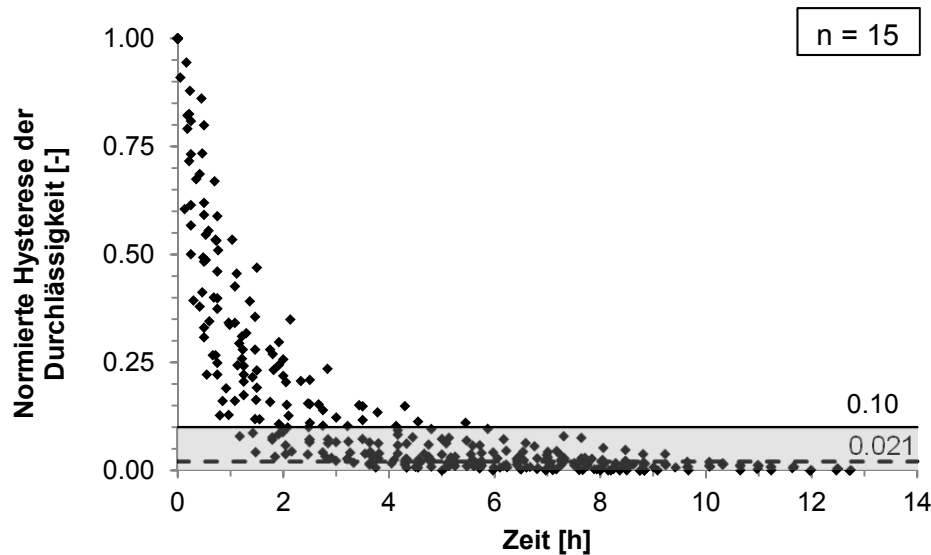


Abbildung 53: Normierte Hysterese bei Systemdurchlässigkeitsmessungen nach FTW-Simulationen. Darstellung von 15 Messungen an 3 Prüfkörpern eines Hinterfüllbaustoffes (Bezeichnung EE) mit quellfähigen Tonanteilen. Die Punkte stellen die gemessenen normierten Durchlässigkeiten dar, die durchgezogene Linie und der grau hinterlegte Bereich die 10 Prozent Markierung, die gestrichelte Linie markiert die mittlere normierte Hysterese nach 6 Stunden Versuchsdauer.

Es ist zu erkennen, dass der Hystereseeffekt sich innerhalb der ersten zwei Stunden mindestens halbiert. Nach vier Stunden beträgt die Hysterese, bis auf wenige Ausnahmen, weniger als zehn Prozent (durchgezogene Linie und grau hinterlegter Bereich). Nach sechs Stunden beträgt die mittlere Hysterese lediglich 2,1 Prozent (gestrichelte Linie). In den vorliegenden Durchlässigkeitsbereichen empfiehlt der ASTM D-5084 [2010] bei einer Abweichung von weniger als 25 Prozent in vier aufeinanderfolgenden Messungen, die Durchlässigkeitsmessung als beendet anzusehen. Bei obigen Messungen wäre dies nach zwei Stunden der Fall. Aufgrund der oben dargestellten Untersuchung wird definiert, dass eine Durchlässigkeitsmessung nach Frostbeanspruchung mindestens sechs Stunden laufen muss, so dass der dargestellte Hystereseeffekt praktisch abgeklungen ist.

Da die Prüfkörper während der FTW Simulation uneingeschränkten Wasserzulauf haben, kann es sich bei dem beschriebenen Effekt nicht um Sättigungsprozesse handeln. Ein mögliches instationäres Temperaturniveau zu Beginn der Messung hat aufgrund der temperaturabhängigen Viskosität des Wassers und der Temperatureausdehnkoeffizienten

der Komponenten einen Einfluss, jedoch nicht in der beschriebenen Größenordnung. Es ist davon auszugehen, dass die Hysterese auf die Komponenten der quellfähigen Tonanteile zurückzuführen ist. Der Verlauf von Durchlässigkeitsmessungen nach FTW Simulationen an Hinterfüllmaterialien ohne quellfähige Tonanteile ist in Abbildung 54 dargestellt.

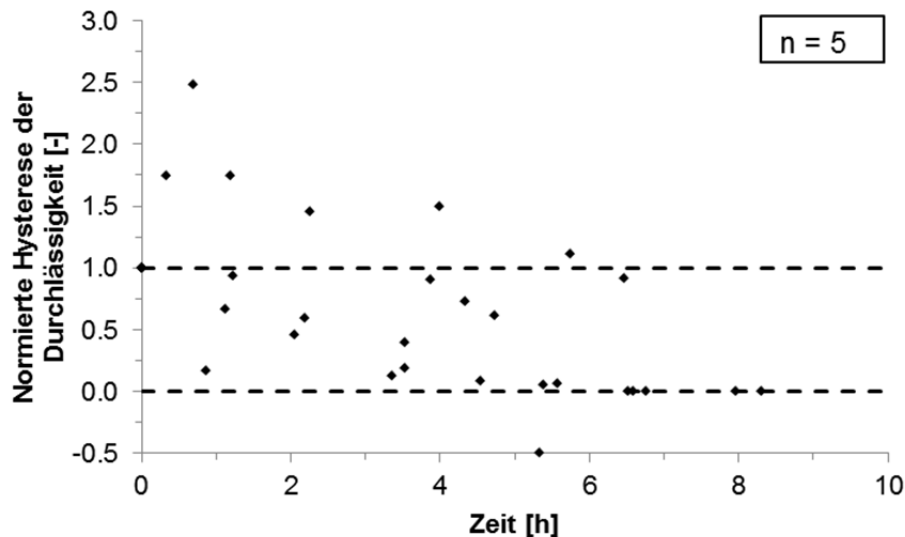


Abbildung 54: Normierte Hysterese der Systemdurchlässigkeitsmessungen von zwei Hinterfüllmaterialien (Bezeichnung EG und (5 Prüfkörper) nach einem FTW. Die Hinterfüllmaterialien enthalten keine quellfähigen Tonanteile. Die gestrichelten Linien markieren den rechnerischen normierten Hysteresebereich zwischen 1 und 0.

Aus der obigen Auswertung ist ersichtlich, dass der Durchlässigkeitsverlauf der Hinterfüllmaterialien ohne quellfähige Tonanteile nicht der Charakteristik aus Abbildung 53 folgt. Es ist kein eindeutig abnehmender Trend mit zunehmender Versuchszeit zu erkennen. Die ermittelten Durchlässigkeiten zu Versuchsbeginn entsprechen bis auf geringe Schwankungen, den Durchlässigkeiten zu Versuchsende. Mit Werten größer eins und kleiner null wird deutlich, dass es sich um normale Schwankungen der Durchlässigkeitsmessungen handelt und nicht um typische Hystereseerscheinungen.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Tonkomponenten der Hinterfüllmaterialien für das stark zeitabhängige Durchlässigkeitsverhalten verantwortlich sind. Das Quellpotenzial und der Quelldruck sind dabei linear vom Massenanteil der quellfähigen Tonminerale abhängig [Rauh & Thuro 2007]. Es ist wahrscheinlich, dass es bei dem Eislinnenwachstum zu einem konkurrierenden Wasserbedarf mit dem in den quellfähigen Tonen eingelagerten Wasser kommt. Eis- und Frosthebungsdrücke von über  $200 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$  sind in tonigen Bodenkörpern nicht ungewöhnlich [Jessberger & Jagow-Klaß 1996,

Hagen, 1996], die umgekehrt zu einem Saugprozess in dem Bodengefüge führen. Je nach Tonkomponenten sind Quelldrücke in ähnlichen Bereichen möglich [Frank 1983]. Ohne Auflast findet das Quellen einiger Tone zum größten Teil in den ersten Minuten bis Stunden nach der Wasserzugabe statt [Kézdi 1976]. Dies entspricht etwa dem Zeithorizont der Hystereseerscheinungen in Abbildung 53, wodurch die Annahme einer zeitweisen Konsolidierung und Wiederaufquellen der Tonkomponenten bestätigt wird.

Die Versuchsauswertungen zeigen, dass mit einer begleitenden Auswertung der Durchlässigkeitsversuche das zeitabhängige Durchlässigkeitsverhalten der Hinterfüllmaterialien nach FTW-Simulationen sicher erfasst werden kann.

## **5.7 Ermittlung der Temperaturverteilung**

### **5.7.1 Thermographische Temperaturmessung**

Um zu überprüfen, ob die Prüfkörper während der FTW-Simulationen einen gleichmäßigen, radialen Wärmefluss erfahren, wie es nach der Linien- oder Zylinderquellentheorie bei EWS der Fall ist [Ingersoll & Plass 1948, Lehr & Sass 2014], wurden thermographische Untersuchungen durchgeführt.

Für die Visualisierung der Temperaturverteilung während der Versuchsdurchführung wurde die berührungslose Messung der Oberflächentemperaturen über Thermographie gewählt. Dabei wird über eine Infrarotkamera<sup>7</sup> die Wellenlänge der Wärmestrahlung gemessen und so auf das, auf einer Oberfläche vorherrschende, Temperaturniveau rückgeschlossen. Für diese Validierungsversuche wurden Prüfkörper eines thermisch verbesserten Hinterfüllmaterials (Bezeichnung EE nach Tabelle 17) unter gleichen Bedingungen hergestellt und bei Raumtemperatur verdunstungsgeschützt gelagert. Nach 28 Tagen wurden die Prüfkörper in die Messzellen überführt, gesättigt und die Temperierung wurde gestartet. Zu definierten Temperierungszeiten wurden die Prüfkörper aus den Messzellen entfernt, aufgespalten und thermographisch vermessen. Jeder Prüfkörper wurde nur einmal aufgespalten und gemessen.

---

<sup>7</sup> Wärmebildkamera „i3“ der Fa. FLIR Systems Inc., Objekttemperaturbereich -20 °C bis +250 °C, Genauigkeit  $\pm 2$  °C oder  $\pm 2\%$  des Ablesewertes (Herstellerangaben).

Durch das Entfernen der Prüfkörper aus den Messzellen, sowie durch das Überführen zur Messstelle und Aufspalten, kommt es zu einer Beeinflussung des Temperaturprofils in den Prüfkörpern. Dabei ist dem Spaltvorgang der größte Einfluss zuzuschreiben. Gerade durch den Kontakt des Spaltwerkzeuges mit dem Prüfkörper kommt es zu einem konduktiven Wärmetransport. Dadurch ist dieser Bereich bei der Auswertung nicht mit einzubeziehen. Die Bruchfläche kann als eine Fläche mit einem weitestgehend ungestörten Temperaturprofil angenommen werden, da die thermografische Messung unmittelbar nach der Spaltung erfolgte. Aufgrund der vorhandenen Randeinflüsse auf das Temperaturprofil, sowie der Messungenauigkeit der Infrarotkamera, sind die absolut gemessenen Werte als Anhaltswerte zu verstehen, welche die Größenordnung bestätigen sollen. Über die Auswertung der relativen Temperaturverteilung in einem Prüfkörper, können weitere Aussagen zum örtlichen Verlauf der Isothermen getroffen und damit die gleichmäßige Durchfrostung der Prüfkörper überprüft werden.

### **5.7.2 Ergebnisse der thermographischen Messungen**

In der folgenden Abbildung 55 ist eine Auswahl von drei Temperaturprofilen zu jeweils unterschiedlichen Versuchszeiten dargestellt. Die Abbildung A zeigt beispielhaft einen aufgespaltenen Prüfkörper nach der thermografischen Messung. Besonders zu beachten ist der rechte Rand, welcher durch den Spaltvorgang stark gestört ist. Dies ist auch bei den Temperaturprofilen (B, C, D) erkennbar. Die Störungszone befindet sich jeweils am rechten Rand.



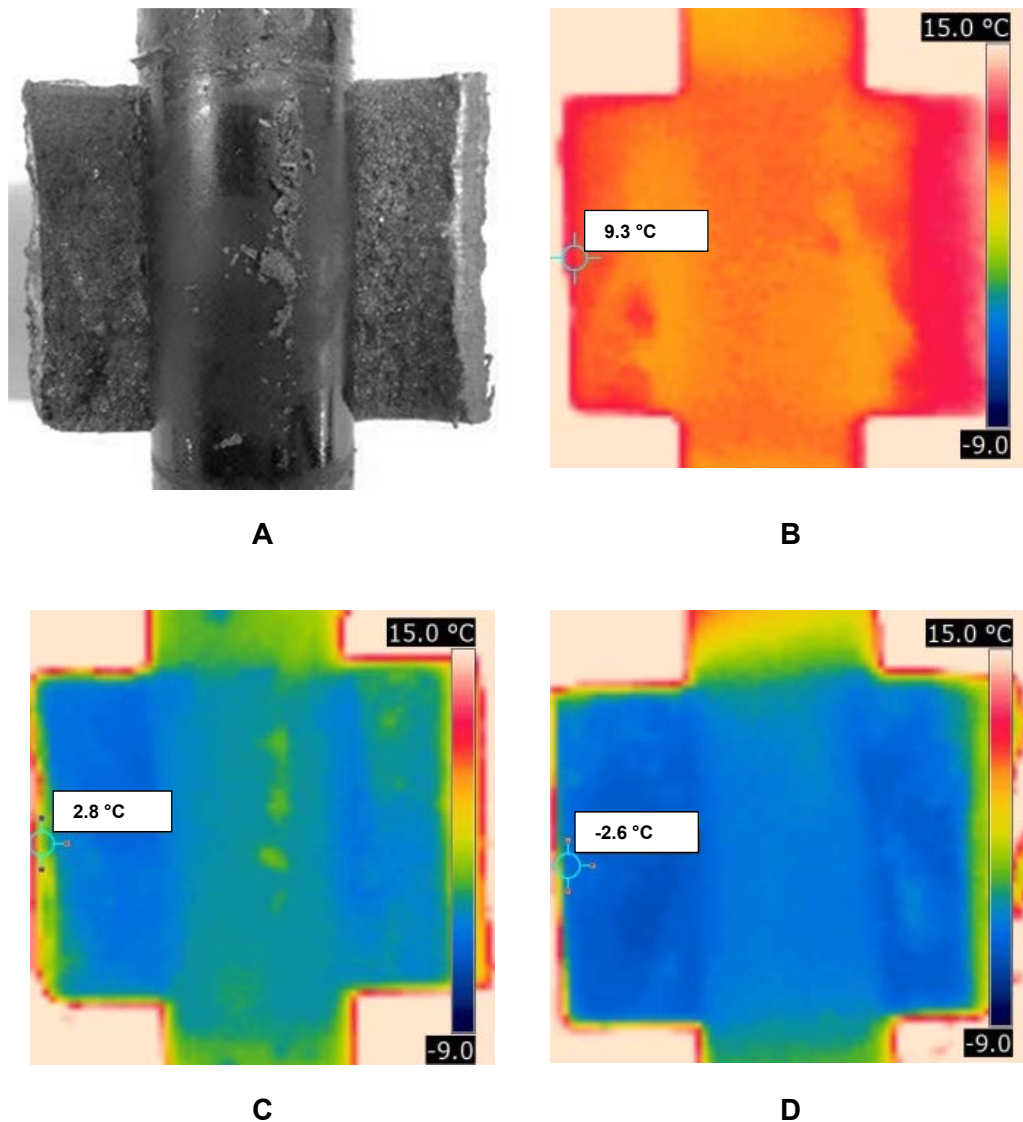


Abbildung 55: Thermografie-Versuche an Prüfkörpern nach definierten Befrostungszeiten. (A) aufgespaltener Prüfkörper, (B) Temperaturprofil nach 1 h Kühlung, (C) Temperaturprofil nach 4 h Kühlung, (D) Temperaturprofil nach 17 h Kühlung [nach Anbergen et al., 2014b]

Die Temperaturprofile in den ungestörten Bereichen weisen nahezu achsenparallel Isothermen auf, welche durch die Bereiche gleicher Einfärbung definiert sind. Dies bestätigt, dass die Durchfrostung der Prüfkörper radial stattfindet, wie es bei der Versuchskonzeption postuliert wurde. Weiterhin ist erkennbar, dass die Prüfkörper über die Versuchszeit auf ein Temperaturniveau unter 0 °C absinken und damit ein potenzielles Frostmilieu vorliegt.

Die Anwendung thermografische Temperaturmessungen hat sich für den vorliegenden Anwendungsfall bewährt, als dass die Temperaturverteilung in dem Prüfkörper zu unterschiedlichen Versuchszeiten qualitativ dokumentiert werden konnte. Zwar sind die

absoluten Werte mit größeren Unsicherheiten behaftet als die Ergebnisse von Messfühlern wie Pt 100 oder K-Fühler, geben jedoch Auskunft über den Temperaturbereich und die relative Verteilung. So konnte die radiale Durchfrostung der Prüfkörper belegt werden.

Die Versuchsergebnisse können ebenfalls in Anbergen & Sass [2013] und Anbergen et al. [2014a, 2014b] nachgelesen werden.

## **5.8 Bewertung der experimentellen Validierung**

Über das vorgestellte Versuchsprogramm wurde die Funktionalität des entwickelten Prüfverfahrens überprüft. Es wurden zwei Kalibrierungsmaterialien charakterisiert und Messungen in drei Erdbaulaboren durchgeführt. Da die Kalibrierungsmaterialien in einer nahezu gleichbleibenden Qualität im Handel frei erhältlich sind, eignen sie sich auch für die Kalibrierung an weiteren Standorten. Die Ergebnisse der Kalibrierungsversuche belegen, dass mit den Messzellen standortunabhängig zuverlässige und reproduzierbare Durchlässigkeitsmessungen realisierbar sind.

Über einen Langzeitversuch konnte gezeigt werden, dass für die Charakterisierung des FTW-Einflusses auf Hinterfüllmaterialien eine beschränkte Anzahl an FTW-Simulationen ausreicht. Die ersten FTW haben den relativ größten Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit der Prüfkörper. Es ist davon auszugehen, dass nach sechs FTW-Simulationen die maximale frostbedingte Durchlässigkeitsänderung erreicht wurde. Dies wird für die weiteren Untersuchungen angewendet. Gezielte Messungen der Systemdurchlässigkeiten direkt nach der Durchfrostung haben einen frostbedingten Hystereseeffekt belegt. Dieser ist materialabhängig (Tonanteil) und muss bei der Versuchsdurchführung berücksichtigt werden.

Durch die Versuche an Einzelkomponenten von Hinterfüllmaterialien konnte gezeigt werden, dass das Prüfverfahren grundsätzlich für die Untersuchung jeglicher Hinterfüllmaterialien für EWS sowie deren Einzelkomponenten geeignet ist. Über thermographische Untersuchungen, konnte gezeigt werden, dass die Durchfrostungsrichtung wie *in-situ* simuliert wird. Dies korreliert mit den visuellen Beobachtungen der achsenparallelen, konzentrischen Rissstrukturen von Prüfkörpern nach FTW-Belastungen.

Die Visualisierung der Fließwege mittels Tracerversuche hat gezeigt, dass es zu einem erhöhten Flüssigkeitstransport entlang der Sondenwandung kommt. Daher ist die

Ermittlung der Systemdurchlässigkeit für die Charakterisierung der hydraulischen Integrität hinterfüllter EWS, welche durch die Prüfkörper simuliert werden, zwingend erforderlich. Weiterhin findet ebenfalls ein Flüssigkeitstransport durch die Struktur des Hinterfüllmaterials statt. Frostbedingte achsenparallel Risstrukturen stellen dabei präferierte Wasserwegigkeiten dar.

Mit dem dargelegten Versuchsprogramm konnte die Funktionalität des Prüfverfahrens experimentell belegt werden.



## 6 NUMERISCHE VALIDIERUNG DER FROST-TAU-WECHSEL-SIMULATION

### 6.1 Software

Für die numerische Simulation der Temperaturprofile in der modifizierten Messzelle und den Prüfkörpern wurde die Simulationssoftware FEFLOW angewandt. FEFLOW wird häufig für die Simulation von Grundwasserströmungsvorgängen mit Massen- und Wärmetransport verwendet. Eine Simulation von Phasenwechselvorgängen ist mit dieser Software nicht möglich [Diersch 2014]. Daher wurde die Berücksichtigung des thermischen Einflusses von Phasenwechsel über ein Plug-In in FEFLOW implementiert.

### 6.2 Annahmen

Der Phasenwechsel von fest zu flüssig und umgekehrt ist in den Geowissenschaften und der Geotechnik von großer Bedeutung, besonders zur Beschreibung von Permafrostgebieten und deren thermisches und hydraulisches Verhalten [McKenzie et al. 2007, Bense et al. 2009, 2012, Qi et al. 2013]. In der Geotechnik werden Durchfrostungsprozesse von Bodenkörpern unterschiedlichster Funktionen simuliert und so Vorhersagen zu den Materialeigenschaften und deren Beständigkeit getroffen [Konrad & Morgenstern, 1980].

Eine Beschreibung des Phasenwechsels des Wassers zwischen fest und flüssig wurde von Stefan [1891] publiziert, basierend auf den mathematischen Ansätzen von Neumann um 1860 [Vuik 2014]. Darin wird auch auf die Einflüsse der Latentwärme eingegangen [Turcotte & Schubert 1982]. Diese physikalischen Zusammenhänge wurden in den folgenden Jahrzehnten weiter untermauert und auf unterschiedliche Anwendungsbereiche übertragen. So haben sich Carslaw & Jaeger [1959] intensiv mit dem Wärmetransport, unter anderem in Böden, beschäftigt. Es wurde eine Vielzahl an analytischen und numerischen Phasenwechselmodellen aufgestellt [u.a. Aldrich & Paynter 1953, Turcotte & Schubert 1982, Coussy 2005]. Besonders exponiert ist dabei die Arbeit von Lunardini [1988], der eine erweiterte analytische Lösung für die Bewegung einer Frostfront in einem Bodenkörper abgeleitet hat, basierend auf der oben beschriebenen *Stefan-Lösung*, auch *Neumann-Lösung* genannt. Dabei werden transzendente Differentialgleichungen gelöst und die mit der Zeit veränderliche Position der Phasenwechselfront bestimmt. Auf

Lunardinis Ansatz wird sich häufig bei der Kalibrierung von numerischen Phasenwechselmodellen bezogen [u.a. McKenzie et al., 2007]. Sie ist eine Erweiterung der Neumann-Lösung, welche die Bewegung der Frostfront in einem semi-infiniten Raum in Abhängigkeit der Zeit beschreibt [Mottaghy & Rath 2006].

Ein Überblick über eine Auswahl von Lösungsansätzen für die numerische Simulation von Phasenwechselvorgängen existierenden Modelle werden detailliert in Piorier & Salcudean [1988] und Hu & Argyropoulos [1996] beschrieben. Als eine praktikable Methode zur Berücksichtigung von Latentwärmeeffekten bei der Modellierung von Durchfrostsprozessen in Böden hat sich die Modifizierung der Wärmekapazität des Wassers bewährt [u.a. Mottaghy & Rath 2006, McKenzie et al. 2007]. In dieser Arbeit wird sich auf diesen Ansatz konzentriert, da die Wärmekapazität in FEFLOW mit nur wenigen Ergänzungen modifiziert werden kann. Die angewendete Methode erfordert relativ geringe Zeitschritte, damit die erhöhte Wärmekapazität im diskreten Bereich des Phasenüberganges berücksichtigt wird. Dadurch wird ein erhöhter Rechenaufwand verursacht [Hu & Argyropoulos 1996]. Für die verwendete Applikation ist dieser erhöhte Rechenaufwand jedoch in einem vertretbaren Rahmen.

Phasenwechselübergänge können von diversen FEM Lösungen simuliert werden, wie COMSOL Multiphysics [2014], SUTRA-ICE [McKenzie et al. 2007], SHEMAT [Mottaghy & Rath 2006], GEO-SLOPE [2014], um nur einige zu nennen. Für FEFLOW stand bis dato keine Phasenwechselloösung zur Verfügung [Anbergen et al., 2014b].

Weitere detaillierte Modelle der Eisbildung und mechanischen Auswirkungen auf die Porengefüge sind u.a. in Coussy [2005] und Bronfenbrener & Bronfenbrener [2010] aufgeführt. Das in dieser Arbeit angewendete Modell fokussiert sich auf die rein thermischen und hydraulischen Auswirkungen der Durchfrostung.

Das vorgestellte Plug-In bezieht sich auf den wassergesättigten Zustand. Das bedeutet, dass in dem Bodenkörper lediglich zwei Phasen vertreten sind, eine flüssige und eine feste Phase. Auf die Simulation von Gasanteilen im Bodenkörper wird hier nicht weiter eingegangen, gleichwohl das Plug-In für diesen Anwendungsfall mit geringem Aufwand modifiziert werden kann.

## 6.3 Berechnungsgrundlagen

### 6.3.1 Allgemeiner Wärmetransport

Wärmetransport in porösen Medien findet vorwiegend konduktiv und konvektiv statt. So lässt sich der Wärmestrom nach Glg. (23) berechnen [u.a. Johansen 1977].

$$(\rho c)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T - \rho_f c_f \mathbf{v}_{eff} T) \quad (23)$$

Mit

$(\rho c)_{eff}$	=	effektive volumetrische Wärmekapazität [ $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ]
$\lambda_{eff}$	=	effektive Wärmeleitfähigkeitstensor [ $\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$ ]
$\rho_f$	=	Dichte des strömenden Fluides [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$c_f$	=	Wärmekapazität des strömenden Fluides [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$\mathbf{v}_{eff}$	=	effektiver Strömungsvektor des Fluides [ $\text{m s}^{-1}$ ]

Dabei wird die Temperaturänderung an einem Punkt von dem konduktiven Wärmetransport in Abhängigkeit von der effektiven Wärmeleitfähigkeit und dem Temperaturgefälle, sowie von dem konvektiven Wärmetransport über strömende Medien beeinflusst. Es wird die effektive Wärmeleitfähigkeit aus den unterschiedlichen, im Boden vorhandenen Phasen berechnet. Der konvektive Anteil wird durch den Fluidtransport bestimmt. Je nach Betrag der einzelnen Komponenten beeinflussen diese den absoluten Wärmetransport. Die Materialeigenschaften der Komponenten sind dabei temperaturabhängig, besonders wenn es zu einem Aggregatzustandswechsel kommt.

### 6.3.2 Eisbildungsprozess

Beim Phasenwechsel von Wasser zu Eis ändern sich die physikalischen Eigenschaften substanziell. So kommt es unter anderem zu einer deutlichen Veränderung der Dichte, der Viskosität, der Wärmeleitfähigkeit und auch der Wärmekapazität [COMSOL 2013, Mottaghy & Rath 2006, Alexiades & Solomon 1993]. Je nachdem welche Temperatur- und Druckverhältnisse auf den Bodenkörper wirken und was für Böden und Wässer vorliegen, verbleibt ein definierter Anteil des Wassers in der flüssigen Phase. Dieser Anteil wird Restwassergehalt genannt. So kann in sehr feinkörnigen Böden auch bei Temperaturen von unter  $-20\text{ °C}$  ungefrorenes Wasser in der Bodenstruktur vorhanden sein [Baier 2008]. Untersuchungen von Zeng et al. [2011] haben ungefrorenes Wasser bei Temperaturen von  $-78\text{ °C}$  nachgewiesen. Der Restwassergehalt variiert in seiner Menge

je nachdem was für ein Boden vorliegt. Er ist in der Regel sehr gering, in der Größenordnung von wenigen Prozenten [Nagare et al. 2012]. Bei dem vorliegenden Modell wird die Simulation eines Restwassergehaltes ermöglicht.

Das Gefrierintervall, in dem der Phasenwechsel von flüssig zu fest stattfindet, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, wie dem Umschließungsdruck, der chemischen Zusammensetzung, der Bodenstruktur etc. [Unold 2006, Baier 2008, Anbergen et al. 2014a]. In feinkörnigen Böden ist dieses Gefrierintervall tendenziell größer, als in grobkörnigen Böden. Für das vorgestellte Modell wurden Gefrierintervalle zwischen einem und vier Kelvin untersucht. Gefrierintervalle von einem Kelvin sind nach den Untersuchungen von Nagare et al. [2012] für die vorliegenden porösen Medien realitätsnahe Ansätze.

### 6.3.3 Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Eis

Die Wärmeleitfähigkeit des Wassers ist temperaturabhängig. Bei dem Phasenübergang von flüssig zu fest kommt es zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um annähernd den Faktor vier. Dies ist in FEFLOW nicht hinterlegt [Diersch 2014]. Dementsprechend wird für die vorliegende Berechnung die Wärmeleitfähigkeit des Wassers modifiziert. Dazu wurden unterschiedliche Berechnungsansätze verglichen. Für die Implementierung wurden die empirischen Berechnungsformeln nach Alexiades & Solomon [1993] verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Eis in Abhängigkeit der Temperatur ergibt sich demnach gemäß Gleichung (24).

$$\begin{aligned}\lambda_{ice} &= 2.240 + 5.975 \cdot 10^{-3} \cdot (-T)^{1.156} & T < 0,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \lambda_{water} &= 1.017 \cdot 10^{-1} + 1.695 \cdot 10^{-3} \cdot (273.15 + T) & T > 0,0 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned} \quad (24)$$

Mit

$$\begin{aligned}\lambda_{ice} &= \textit{isotrope Wärmeleitfähigkeit von Eis [W K}^{-1} \text{ m}^{-1}] \\ \lambda_{water} &= \textit{isotrope Wärmeleitfähigkeit von Wasser [W K}^{-1} \text{ m}^{-1}]\end{aligned}$$

In der ursprünglichen Formel geht die Temperatur in der Kelvin'schen Skala mit dem absoluten Nullpunkt bei 0 K ein. Für die Implementierung wurde die Formel für die Temperatur in °C umgerechnet [Anbergen et al. 2014b].

Das Modell nach Alexiades & Solomon [1993] wird in Abbildung 56 mit den Modellen nach Slack [1980] für Eis und Wagner & Kretschmar [2008] für Wasser vergleichend gegenübergestellt.



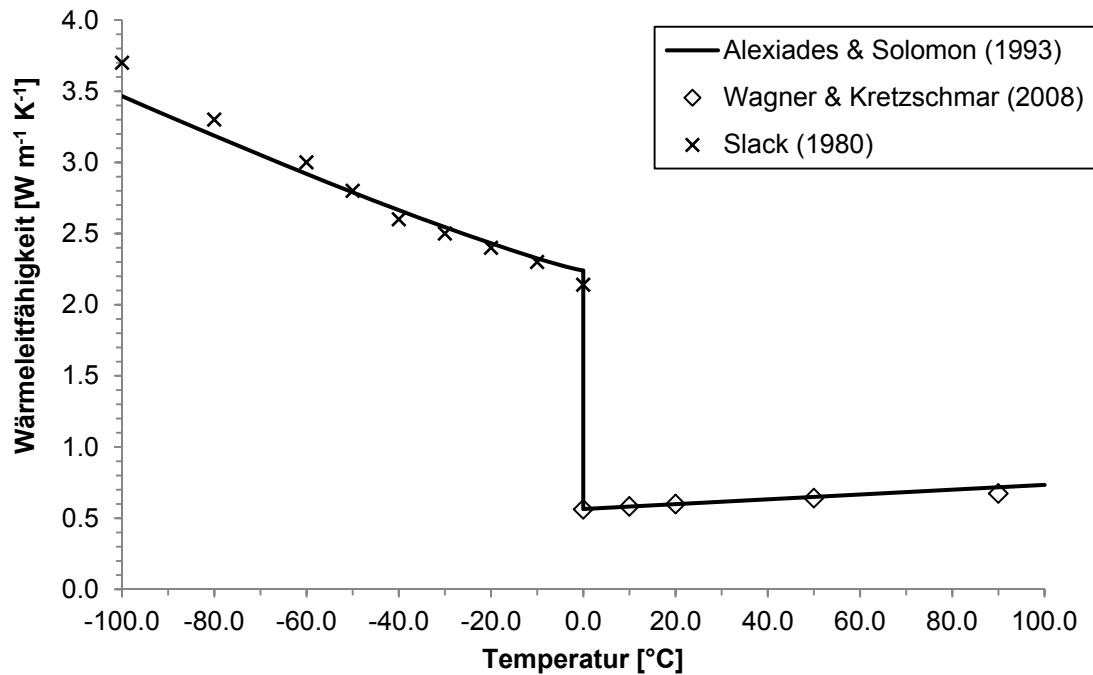


Abbildung 56: Wärmeleitfähigkeit von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur [verändert nach Anbergen et al. 2014b]

Wie aus der Grafik erkennbar, stimmt das Modell nach Alexiades & Solomon mit den anderen Ansätzen gut überein. Die Modifikation der Wärmeleitfähigkeit wurde daher über den Ansatz von Alexiades & Solomon implementiert.

In dem Bereich des Gefrierintervalls hängt die Massenverteilung von Wasser und Eis von diversen Aspekten ab (siehe oben). Als Näherung wird für den Übergangsbereich von flüssiger zu fester Phase eine lineare Interpolation über das Gefrierintervall gewählt. Die lineare Interpolation für den Übergangsbereich (hier ein Kelvin) ist in Abbildung 57 dargestellt.

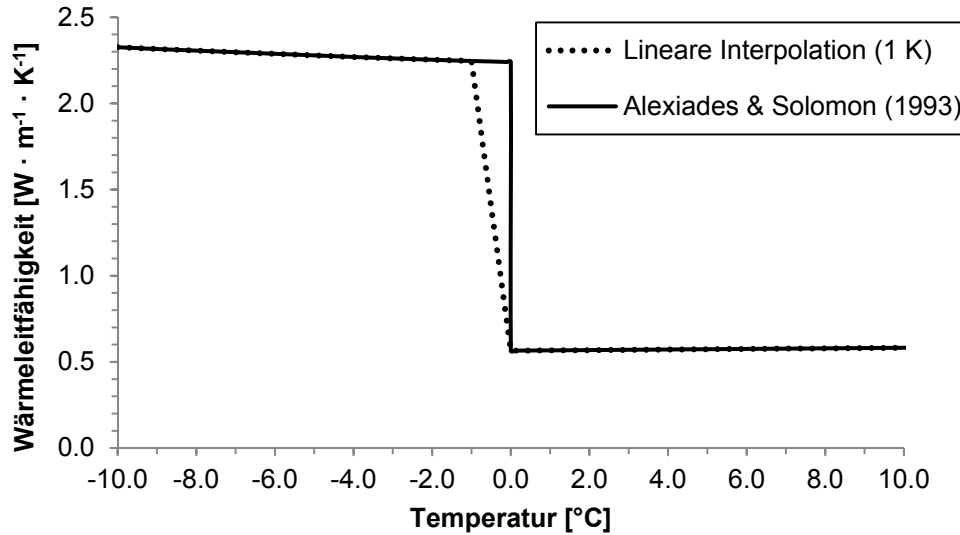


Abbildung 57: Modifizierte Wärmeleitfähigkeit der flüssigen und festen Phase von Wasser  
[Anbergen et al., 2014b]

Das Gefrierintervall kann dabei im Plug-In beliebig vergrößert oder verkleinert werden. Weiterhin ist auch eine stetige und differenzierbare Interpolation über das Euler'sche Exponentialintegral möglich, dieser Ansatz wird weiter unten beschrieben. Die modifizierte Wärmeleitfähigkeit, in flüssigem oder festem Aggregatzustand, wird FEFLOW vor der Wärmeberechnung übergeben. FEFLOW berechnet die gesamte Wärmeleitfähigkeit der Bodenmatrix und des Fluides (im vorliegenden Fall des Phasenübergangsmaterials) linear [Diersch 2014]. Allgemein formuliert ermittelt sich die effektive Wärmeleitfähigkeit gemäß Gleichung (25).

$$\lambda_{eff} = \frac{\sum_j^n \varepsilon_j \cdot \lambda_j}{\sum_j^n \varepsilon_j} \quad (25)$$

Mit

$\lambda_j$  = Wärmeleitfähigkeitstensor des Materials  $j$  [ $\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$ ]

$\varepsilon_j$  = Relativer Anteil des Materials  $j$  an der Gesamtmatrix [-]

Dabei ergeben die einzelnen Anteile der Bodenmatrix in deren Summe 100% (26).

$$\sum_j^n \varepsilon_j = 1 \quad (26)$$

In dem Fall von lediglich Wasser und Bodenanteilen unter Annahme einer isotropen Wärmeleitfähigkeit folgt aus Gleichung (25) die Gleichung (27).

$$\lambda_{eff}(T) = \varepsilon \cdot \lambda_{water}(T) + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_{soil}(T) \quad (27)$$

Mit

$\lambda_{water}$  = isotrope Wärmeleitfähigkeit des Wassers [ $\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$ ]

$\lambda_{soil}$  = isotrope Wärmeleitfähigkeit des Bodens [ $\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$ ]

$\varepsilon$  = Porosität Bodens [-]

Alternativ gibt es Ansätze die effektive Wärmeleitfähigkeit über das geometrische Mittel zu errechnen [Mottaghy & Rath 2006, DGG & DGGT 2014]. Aufgrund der Programmarchitektur von FEFLOW wird hier der lineare Ansatz gewählt [Anbergen et al. 2014b, Diersch 2014]. Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges ist in den betrachteten Bereichen als annähernd konstant anzusehen und kann daher vernachlässigt werden.

### 6.3.4 Wärmekapazität

Neben der Wärmeleitfähigkeit, ist auch die Wärmekapazität von der Temperatur abhängig. Die Wärmekapazität des Wassers wird für den flüssigen Zustand als konstant angenommen, da hier nur sehr geringe Veränderungen auftreten [Alexiades & Solomon 1993]. Für den eisförmigen Zustand wird eine variable Wärmekapazität angesetzt. Die empirische Berechnungsformel von Alexiades & Solomon [1993] ist in Gleichung (28) aufgeführt.

$$\begin{aligned} c_{ice} &= 7,16 \cdot (273,15 + T) + 138,00 & T < 0,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ c_{water} &= 4186,80 & T > 0,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (28)$$

Mit

$c_{ice}$  = Wärmekapazität des Eises [ $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ ]

$c_{water}$  = Wärmekapazität des Wassers [ $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ ]

Das Modell nach Alexiades & Solomon [1993] wird in Abbildung 58 mit Werten nach Miller [1982] und Wagner & Pruß [2002] verglichen. Weiterhin ist der lineare Übergang im Gefrierintervall dargestellt, da FEFLOW die Wärmekapazität des Modells ebenfalls linear interpoliert.

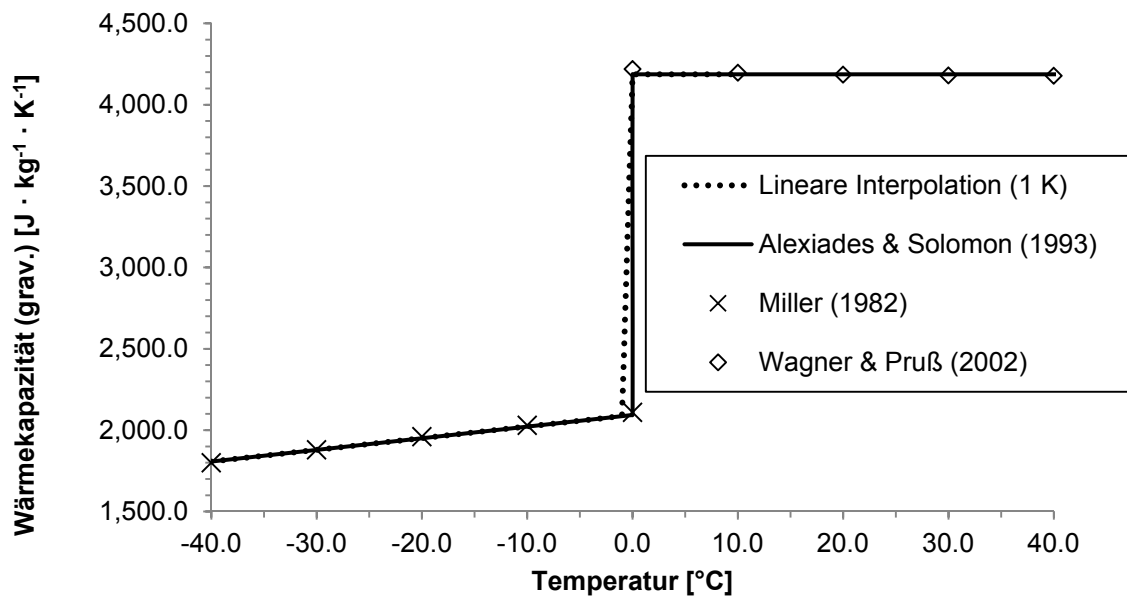


Abbildung 58: Lineare Interpolation der Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur [Anbergen et al, 2014b]

Es ist eine hohe Übereinstimmung der Modelle ersichtlich. Für die numerische Umsetzung wird das Modell nach Alexiades & Solomon (28) angewendet.

Analog zur Wärmeleitfähigkeit, wird die volumetrische Wärmekapazität wie folgt den Volumenanteilen nach gewichtet, wie in Gleichung (29) beschrieben.

$$(\rho c)_{eff} = \frac{\sum_j^n \varepsilon_j \cdot (\rho c)_j}{\sum_j^n \varepsilon_j} \quad (29)$$

Im wassergesättigten Zustand ergibt sich folglich die volumetrische Wärmekapazität zu Gleichung (30).

$$(\rho c)_{eff}(T) = \varepsilon \cdot \rho_{water}(T) \cdot c_{water}(T) + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{soil}(T) \cdot c_{soil}(T) \quad (30)$$

Mit

- $\varepsilon$  = Porosität [-]
- $\rho$  = Dichte [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $c$  = Wärmekapazität [ $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ ]

Dabei ist wiederum in den betrachteten Temperaturbereichen von einer annähernd konstanten Dichte und Wärmekapazität des Gebirges auszugehen.

### 6.3.5 Latentwärme

Um die Temperatursausbreitung unter Phasenwechselmechanismen im Nahfeld von Erdwärmesonden numerisch abzubilden, müssen die Latentwärmeeinflüsse berücksichtigt werden. Die Latentwärme ist dabei definiert als die Menge an Wärme, die bei dem Phasenwechsel von einem Kilogramm flüssigen Materials zum festen Material freigesetzt wird [Turcotte & Schubert 1982]. In den folgenden Betrachtungen wird sich auf Wasser als Phasenwechselmaterial beschränkt. Die Freisetzung der thermischen Energie wird numerisch häufig über eine Modifikation der Wärmekapazität des Fluides umgesetzt [u.a. Hu & Argyropoulos 1996, Mottaghy & Rath 2006, McKenzie et al. 2007]. Dabei wird in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit des Phasenwechsels, die Wärmekapazität um einen definierten Wert erhöht. Für die Berechnung muss definiert werden, wie viel Wasser und Eis in einem Probenvolumen vorhanden ist. Dies wird über eine relative Sättigung nach Gleichung (31) ausgedrückt [McKenzie et al., 2007].

$$S_{water}(T) + S_{ice}(T) = S_r \quad (31)$$

Mit

$S_r$  = relativer Sättigungsgrad an Wasser im Boden [-]

$S_{water}$  = relativer Sättigungsgrad an flüssigem Wasser [-]

$S_{ice}$  = relativer Sättigungsgrad an festem Wasser (Eis) [-]

In der vorliegenden Betrachtung wird von einem wassergesättigten Zustand im Bodenkörper ausgegangen. Die relative Sättigung von gefrorenem und ungefrorenem Wasser beträgt zusammen 100 %.

$$S_{water} + S_{ice} = 1 \quad (32)$$

Abgeleitet daraus ergibt sich Gleichung (33). Diese beschreibt, dass die temperaturabhängige Änderungen der anteiligen Sättigungszahlen umgekehrt proportional zueinander sind.

$$\frac{\partial S_{water}}{\partial T} = - \frac{\partial S_{ice}}{\partial T} \quad (33)$$

Für die numerische Abbildung des Latentwärmeeinflusses wird die Wärmekapazität des Fluides (in diesem Fall Wasser) durch eine scheinbare Wärmekapazität (apparent heat capacity  $c_{app}$ ) zum Zeitpunkt der Phasenumwandlung ersetzt. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass der Prozess drei Stadien umfasst. Den flüssigen Zustand, den festen Zustand ohne flüssigen Restwassergehalt und den Übergangszustand. Während dieser

Verfestigung des Porenwassers von flüssig zu fest wird Kristallisationswärme freigesetzt. Die Grenzen der einzelnen Phasen werden nach Lunardini [1988] als Übergangstemperatur vom flüssigen Zustand  $T_{water}$  [°C] und Übergangstemperatur zum festen Zustand  $T_{ice}$  [°C] definiert. Die Latentwärme wird in Abhängigkeit zur Änderung der relativen Sättigung an gefrorenem Wasser freigesetzt.

$$c_{app} = \begin{cases} S_{water} \cdot \rho_{water} \cdot c_{water} & T > T_{water} \\ S_{water} \cdot \rho_{water} \cdot c_{water} + S_{ice} \cdot \rho_{ice} \cdot c_{ice} - \rho_{ice} \cdot LF \cdot \frac{\partial S_{ice}}{\partial T} & T_{water} > T > T_{ice} \\ S_{ice} \cdot \rho_{ice} \cdot c_{ice} & T_{ice} > T \end{cases} \quad (34)$$

Mit

$LF$  = Latentwärme [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$c_{app}$  = scheinbaren Wärmekapazität [ $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$ ]

Für die Berechnung in FEFLOW wird die volumetrische Wärmekapazität des Fluides durch die scheinbare Wärmekapazität nach Gleichung (35) ersetzt.

$$(\rho c)_{water'} = c_{app} \quad (35)$$

Durch die modifizierte Wärmekapazität des Fluides  $(\rho c)_{water'}$  wird zusätzliche Wärmeenergie in das System gegeben und der Phasenumwandlungsprozess verlangsamt. So wird dann (35) in (30) eingesetzt.

$$(\rho c)_{eff} = \varepsilon \cdot (\rho c)_{water'} + (1 - \varepsilon) \cdot (\rho c)_{soil} \quad (36)$$

Für die Abbildung des Durchfrostungsprozesses kann eine lineare Beziehung zwischen der flüssigen und festen Phase angenommen werden [McKenzie et al. 2007]. Daraus ergibt sich für die anteilige Wassersättigung Gleichung (37) unter Miteinbeziehung eines möglichen Restwassergehalts an ungefrorenem Wasser, auch bei Temperaturen unter  $T_{ice}$ .

$$S_{water} = \begin{cases} 1 & T \geq T_{water} \\ m \cdot T + 1 & T_{water} > T > T_{ice} \\ S_{water,res} & T_{ice} \geq T \end{cases} \quad (37)$$

Mit

$S_{water,res}$  = Restwassergehalt an flüssigem Wasser [-]

$m$  = Steigung der linearen Übergangsfunktion [ $K^{-1}$ ]

Die erste Ableitung der relativen Wassersättigung nach der Temperatur führt folglich zu Gleichung (38).

$$\frac{\partial S_{water}}{\partial T} = \begin{cases} 0 & T \geq T_{water} \\ m & T_{water} > T > T_{ice} \\ 0 & T_{ice} \geq T \end{cases} \quad (38)$$

Wird von einem Gefrierintervall, in dem der Phasenwechsel stattfindet, von einem Kelvin ausgegangen und ein Restwassergehalt von null angesetzt, lassen sich die obigen Gleichungen zu den Gleichungen (39) und (40) umformulieren.

$$S_{water} = \begin{cases} 1 & T \geq 0 \\ T + 1 & 0 > T > -1 \\ 0 & -1 \geq T \end{cases} \quad (39)$$

$$\frac{\partial S_{water}}{\partial T} = \begin{cases} 0 & T \geq 0 \\ 1 & 0 > T > -1 \\ 0 & -1 \geq T \end{cases} \quad (40)$$

Bei der Annahme eines größeren oder kleineren Gefrierintervalls ändert sich auch die Steigung der Sättigungsfunktion, und damit verschieben sich auch die Definitionsgrenzen  $T_{water}$  wenn der Gefriervorgang nicht bei 0 °C beginnt und  $T_{ice}$  wenn der Gefriervorgang über ein breiteres oder schmaleres Intervall stattfindet. Ebenso hat der Restwassergehalt  $S_{water,res}$  Einfluss auf die Phasengrenze  $T_{ice}$  bei vorgegebener Steigung  $m$ .

Dabei ist es zwingende Voraussetzung, dass bei den beiden gewählten Ansätzen, jeweils die über das Gefrierintervall hinzugefügte Energie, gleich der angesetzten Latentwärme ist. Dies wird gemäß (34) über die differenzierten Sättigungsfunktionen berücksichtigt. Das Integral über das Gefrierintervall, als auch darüber hinaus, muss demnach gleich eins sein, wenn ein vollständiges Gefrieren vorausgesetzt wird. Folglich muss die Gleichung (41) erfüllt werden.

$$\left| \int_{T_{water}}^{T_{ice}} \frac{\partial S_{ice}}{\partial T} \right| \stackrel{\text{def}}{=} \left| \int_{T_{water}}^{T_{ice}} \frac{\partial S_{water}}{\partial T} \right| = 1 \quad (41)$$

Als weitere Option kann ein exponentieller Ansatz gewählt werden. Dabei wird anstatt einer linearen Interpolation im Übergangsbereich, eine abgeschwächte Stufenfunktion über eine Euler'sche Exponentialfunktion gewählt. Diese hat den Vorteil, dass sie voll differenzierbar ist. Der exponentielle Ansatz kann nach McKenzie et al. [2007] ausgedrückt werden über die Gleichungen (42) und (43).

$$S_{water} = \begin{cases} 1 & T \geq T_{water} \\ (1 - S_{water,res}) \cdot e^{-\left(\frac{T-T_{water}}{w}\right)} + S_{water,res} & T < T_{water} \end{cases} \quad (42)$$

$$\frac{\partial S_{water}}{\partial T} = \begin{cases} 0 & T \geq T_{water} \\ -(1 - S_{water,res}) \cdot \frac{2 \cdot (T - T_{water})}{w^2} \cdot e^{-\left(\frac{T-T_{water}}{w}\right)} & T < T_{water} \end{cases} \quad (43)$$

Bei dem exponentiellen Ansatz ist das Gefrierintervall nicht so scharf begrenzt, wie bei dem linearen Ansatz. Die volle Differenzierbarkeit ist numerisch stabiler und durch die Verwendung der Euler'schen Exponentialfunktion kann die Ableitung zügig ermittelt werden. Die beiden Ansätze werden in Abbildung 59 und Abbildung 60 exemplarisch graphisch dargestellt.

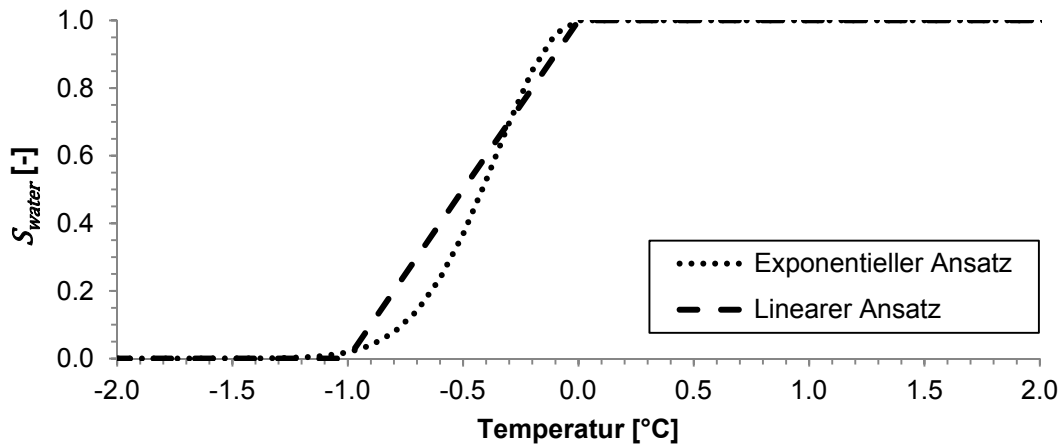


Abbildung 59: Funktion der relativen Sättigung  $S_{water}$  an ungefrorenem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Gefrierintervall von 1 K im linearen Fall und  $w = 0.5$  im exponentiellen Fall,  $S_{water,res} = 0$  [Anbergen et al. 2014b]

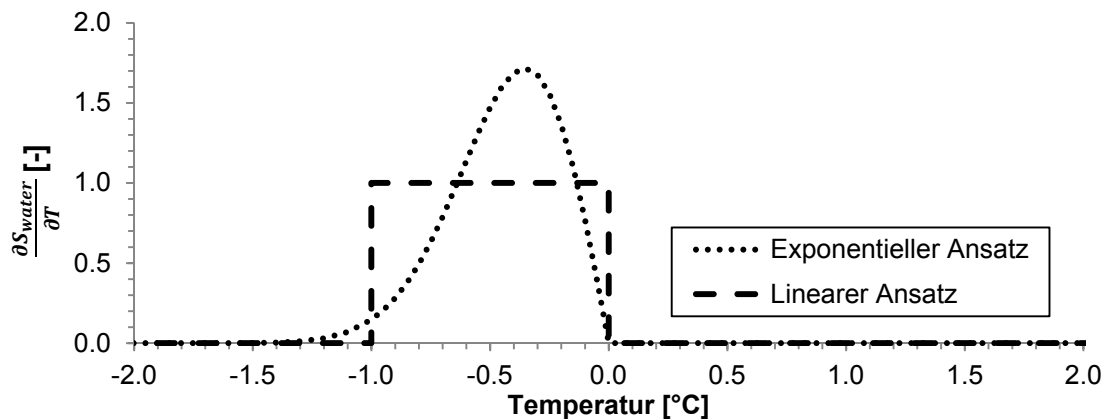


Abbildung 60: Funktion der Änderungsrate der relativen Sättigung  $S_{water}$  an ungefrorenem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Gefrierintervall von 1 K im linearen Fall und  $w = 0.5$  im exponentiellen Fall,  $S_{water,res} = 0$  [Anbergen et al. 2014b]

Somit wird während der Berechnung der Wärmekapazität in dem Übergangsbereich je nach Gefrierintervall und Ansatz der latente Energieanteil zu der Wärmekapazität addiert (Abbildung 61).



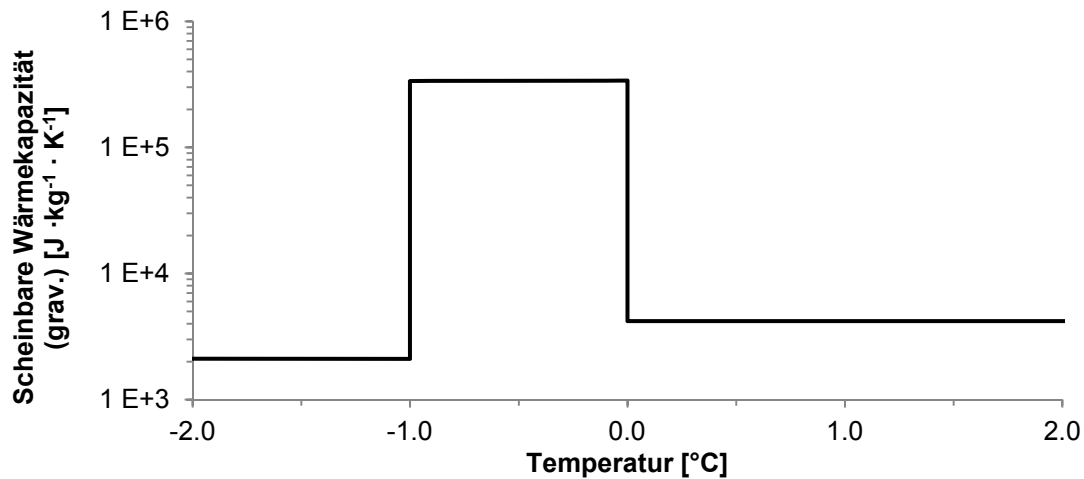


Abbildung 61: Scheinbare Wärmekapazität  $C_{app}$  in Abhängigkeit der Temperatur bei linearen Ansatz und einem Gefrierintervall von 1 K und  $S_{water,res} = 0$  [nach Anbergen et al. 2014b]

### 6.3.6 Dichte des Wassers und des Eises

Wie auch die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, ist die Dichte des Wassers ebenfalls temperaturabhängig [u.a. Magri 2009]. Dies hat unter anderem einen signifikanten Einfluss auf den Wärmetransport in porösen Medien, als dass nicht nur der konvektive Wärmetransport beeinflusst, sondern über die volumetrische Wärmekapazität der gesamte Wärmefluss beeinträchtigt wird. Dabei ist in der flüssigen Phase eine stärkere Temperaturabhängigkeit je Kelvin zu beobachten, als in der festen Phase. Abbildung 62 zeigt exemplarisch die Dichteveränderung des Wassers für die flüssige Phase nach Wagner & Pruß [2002] und einen konstanten Wert für die feste Phase.

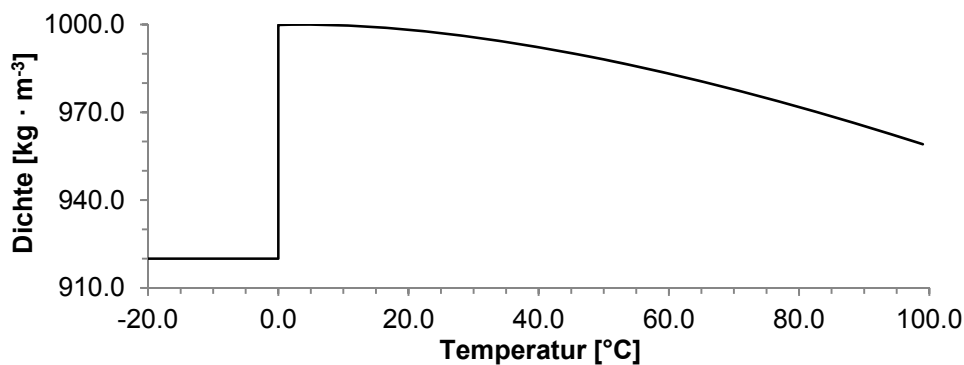


Abbildung 62: Dichte des Wassers in Abhängigkeit der Temperatur nach Wagner & Pruß [2002].

Eine numerische Implementierung in FEFLOW der temperaturabhängigen Dichte des Wassers über den thermischen Ausdehnkoeffizienten hat Magri [2009] veröffentlicht, welcher ebenfalls im Plug-In hinterlegt wurde. In dem Bereich der hier betrachteten

Temperaturen ist der Temperatureinfluss auf die Dichte des Wassers mit Ausnahme des Phasenüberganges als gering einzustufen. Daher wird für die Validierung des Temperaturprofils während der Versuchsdurchführung mit abschnittsweise (fest und flüssig) konstanten Dichten gerechnet, um den Rechenaufwand gering zu halten.

Der Dichteunterschied zwischen Wasser und Eis beträgt näherungsweise neun Prozent im Bereich des Phasenübergangs. Dies führt u.a. zu veränderten Spannungszuständen im Porengefüge [Coussy 2005]. Da bei der Entwicklung des Plug-Ins der Wärmefluss im Fokus steht, wird für die Implementierung die häufig angewendete Annahme getroffen, dass das Wasser und das Eis das gleiche Volumen über den modellierten Temperaturbereich aufweisen (Abbildung 63).

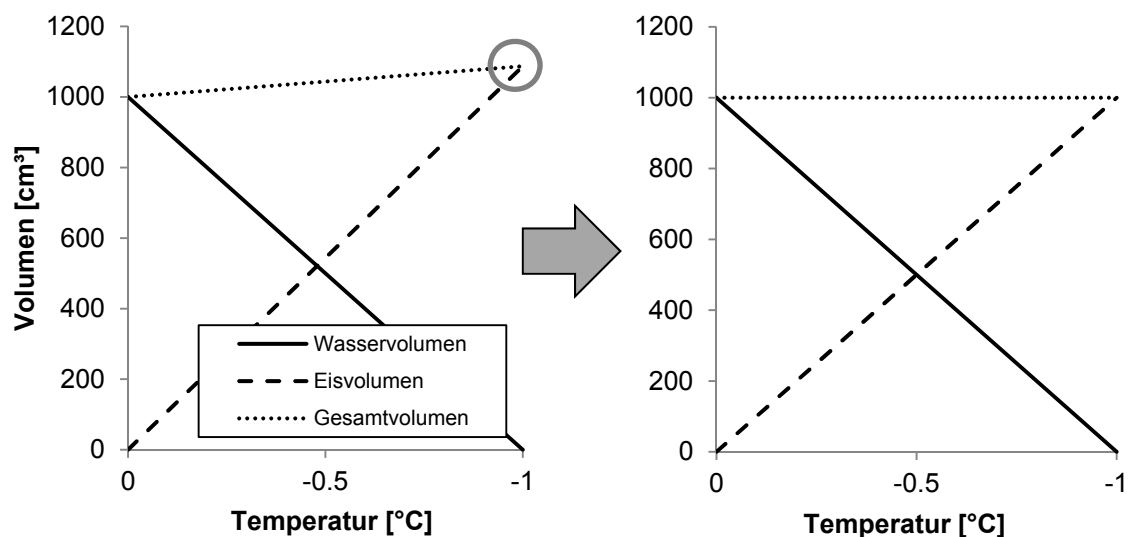


Abbildung 63: Annahme eines konstanten Volumens.

Die Annahme eines konstanten Volumens während der Simulation hat lediglich nachrangige Auswirkungen auf die Temperatursausbreitung im Modell. Trotz des rechnerisch konstanten Volumens, wird die oben beschriebene Dichte des Wassers und des Eises für die Berechnung der Wärmekapazitäten und des konduktiven Wärmetransportes unverändert berücksichtigt, sodass dadurch kein numerischer Fehler für die Temperaturverteilung entsteht.

### 6.3.7 Wasserdurchlässigkeit der Matrix

Bei dem Phasenwechsel von flüssiger zur festen Phase wird neben den Materialeigenschaften des Wassers auch das Strömungsverhalten beeinflusst. Dabei verringert das erstarrte Wasser die Porenräume und verringert somit den Durchströmungsquerschnitt für das noch flüssige Wasser. Dabei ist neben der Menge an

erstarrtem Wasser (Eis) und der Dichte, auch die Viskosität von Bedeutung. Bei dem vorliegenden Modell wird angenommen, dass das gesamte verfügbare Wasser bei  $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (linearer Ansatz, Parameterstudien ausgenommen) erstarrt ist. Bereits zum Beginn der Phasenumwandlung wird die Strömung des Wassers so stark durch den Phasenwechsel und die höhere Viskosität verringert, dass die Strömung bei  $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  zu null gesetzt wird und somit kein Wassertransport mehr stattfindet.

Bei geringer Wasserdurchlässigkeit findet daher der Wärmetransport vorwiegend konduktiv statt. Dies ist zum Beispiel bei bindigen Böden oder Hinterfüllmaterialien für Erdwärmesonden der Fall. Entsprechend hat konvektiver Wärmetransport in diesem Fall einen sehr geringen Einfluss [Bonacina et al. 1973]. Durch die Modifizierung der Wasserdurchlässigkeit ab einer Temperatur von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  wird mit dem Beginn des Eisbildungsprozesses der konvektive Wärmetransport unterbunden. Das bedeutet, dass unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  der Wärmetransport rein konduktiv stattfindet. Diese Annahme unterschätzt somit den tatsächlichen Wärmetransport. Da jedoch der konvektive Wärmetransport in den zu untersuchenden porösen Materialien als sehr gering einzustufen ist, ist der Fehler gering und als vernachlässigbar einzustufen. Somit stellt die Verringerung der Wasserdurchlässigkeit eine praktikable Annahme dar.

## **6.4 Validierung des numerischen Modells**

### **6.4.1 Benchmark Modelle**

Für die Validierung des entwickelten numerischen Ansatzes für FEFLOW werden an Probemodellen Vergleiche zu analytischen und numerischen Lösungen berechnet und bewertet. Weiterhin wird über Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien das Plug-In auf dessen Funktion geprüft. Die Grundlagen der Benchmark Modelle und der durchgeführten Simulationen werden im Folgenden beschrieben.

### **6.4.2 Neumann-Lösung**

Die Neumann-Lösung [Carslaw & Jäger 1959, Mottaghy & Rath 2006, Vuik 2014], beschreibt eine mathematische Lösung des schlagartigen, einseitigen Abkühlens eines flüssigen Mediums in einem Halbraum. Dabei ist die Ausgangstemperatur des Mediums die Grenztemperatur  $T_{water}$  zwischen flüssiger und fester Phase; der Halbraum ist groß genug gewählt, dass sich das Temperaturprofil bei den gewählten Berechnungszeiten bis zum Modellrand asymptotisch der Ausgangstemperatur nähert. Eine grafische Darstellung

des gewählten Modellaufbaus in Anlehnung an McKenzie et al. [2007] ist der Abbildung 64 zu entnehmen.

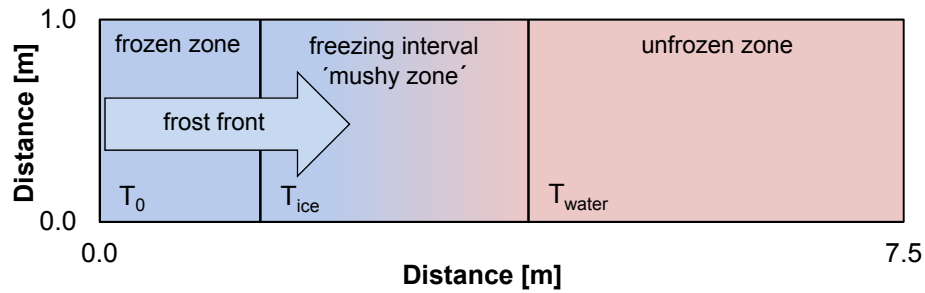


Abbildung 64: Schematische Darstellung des Halbraummodells zur Kalibrierung des FEFLOW Plug-Ins [verändert nach McKenzie et al., 2007, aus Anbergen et al., 2014b].

Die Neumann-Lösung berechnet die Ortskoordinate  $X_{ice}(t)$  der Frostfront. Dabei ist die Frostfront als die maximale Temperatur  $T_{ice}$  definiert, bei der das gesamte Porenwasser in die feste Phase übergegangen ist. Es wird von einem vernachlässigbaren Restwassergehalt an flüssigem Wasser ausgegangen. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird angenommen, dass die Ausgangstemperatur in dem Modell  $T = T_{water}$  ist. Das Modell wird hier an der linken Wandung durch die Temperatur  $T_0 < T_{ice}$  abgekühlt. Unter diesen Voraussetzungen gilt für die Berechnung der Lage der Frostfront die Gleichung (44).

$$X_{ice}(t) = 2 \cdot \gamma \cdot \sqrt{\alpha_{ice} \cdot t} \quad (44)$$

Mit

$\gamma$  = Formfaktor [-]

$\alpha_{ice}$  = thermische Diffusivität des Eises [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]

$t$  = Zeit [s]

Dabei ist in der Ausgangslösung die thermische Diffusivität des Eises definiert nach Gleichung (45).

$$\alpha_{ice} = \frac{\lambda_{ice}}{\rho_{ice} \cdot c_{ice}} \quad (45)$$

Die thermische Diffusivität des Wassers ist definiert nach Gleichung (46).

$$\alpha_{water} = \frac{\lambda_{water}}{\rho_{water} \cdot c_{water} + \rho_{water} \cdot LF \cdot \frac{\partial S_{water}}{\partial T}} \quad (46)$$

Der Formfaktor  $\gamma$  wird nach Gleichung (47) berechnet.

$$\frac{e^{\left(\frac{(a_{ice} - a_{water}) \cdot \gamma^2}{a_{water}}\right)} \cdot \operatorname{erfc}\left(\gamma \cdot \sqrt{\frac{a_{ice}}{a_{water}}}\right)}{\operatorname{erf}(\gamma)} = \frac{(T_{water} - T_{ice}) \cdot \lambda_{soil} \cdot \sqrt{\alpha_{ice}}}{(T_{ice} - T_0) \cdot \lambda_{ice} \cdot \sqrt{\alpha_{water}}} \quad (47)$$

Die Neumann-Lösung gilt für Probevolumen aus Wasser. Eine Simulation in porösen Medien ist nicht vorgesehen. Die analytische Neumann-Lösung wird mit dem entwickelten FEFLOW Plug-In und einer numerischen Lösung mit SHEMAT von Mottaghy & Rath [2006] verglichen.

SHEMAT kann aufgrund seiner Programmarchitektur Porositäten von  $\varepsilon = 1$  nicht simulieren [Mottaghy & Rath 2006]. Daher wird für die numerische Simulation der Neumann-Lösung nicht mit einem rein wassergefülltem System, sondern mit einer Bodenmatrix mit einer sehr hohen Porosität ( $\varepsilon = 0,95$ ) gerechnet. Dadurch sind geringfügige Abweichungen bei den Ergebnissen unumgänglich. Diese sind jedoch als gering einzuordnen.

Für die Simulation mit FEFLOW wurde ebenfalls eine hohe Porosität angewendet. Die Randbedingungen für die nachfolgende Rechnung sind in Tabelle 12, eine grafische Darstellung in Abbildung 65, aufgeführt.

Tabelle 12: Modellparameter für die Berechnung der Temperaturverteilung während des Durchfrostungsprozesses [Anbergen et al. 2014b]

Parameter	FEFLOW	Einheit
Grav. Wärmekapazität des Fluides	4 187	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Wärmeleitfähigkeit des Fluides	variabel <sup>a</sup>	J s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Dichte des Fluides	variabel <sup>b</sup>	kg m <sup>-3</sup>
Grav. Wärmekapazität des Eises	variabel <sup>a</sup>	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Wärmeleitfähigkeit des Eises	variabel <sup>a</sup>	J s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Dichte des Eises	920	kg m <sup>-3</sup>
Vol. Wärmekapazität des Gebirges	2,06	MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
Wärmeleitfähigkeit des Gebirges	2,9	J s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Porosität	0,05 / 0,95 <sup>d</sup>	-
Hydraulische Durchlässigkeit	6,5 · 10 <sup>-4</sup> <sup>c</sup>	m s <sup>-1</sup>
Latentwärme	334 000	J kg <sup>-1</sup>
Maximale Zeitschritt gröÙe	0,25 / 24 <sup>d</sup>	h
Totale Simulationszeit	2 / 99 <sup>d</sup>	d

a Die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität werden nach den Ansätzen von Alexiades & Solomon [1993] berechnet, b für die Validierung abschnittsweise konstant, c variabel unter 0.0°C, d variiert je nach Modellansatz

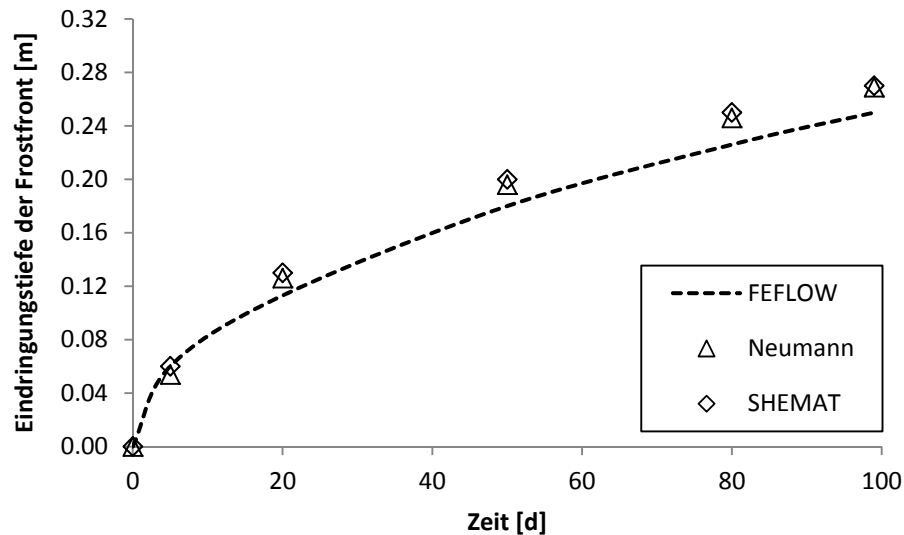


Abbildung 65: Vergleich der FEFLOW Lösung mit der analytischen Neumann Lösung und einer numerischen Lösung mit SHEMAT [Mottaghy & Rath 2006]. Modellparameter: Exponentielle Übergangsfunktion mit  $w = 1,0$ , Porosität  $\varepsilon = 0,95$ ,  $T_{\text{water}} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{ice}} = -2^{\circ}\text{C}$ ,  $T_0 = -3^{\circ}\text{C}$ . [verändert nach Anbergen et al. 2014b]

Aus der obigen Grafik ist zu erkennen, dass die FEFLOW Lösung sowohl der analytischen, als auch der numerischen Lösung mit SHEMAT, ähnelt. Die Eindringtiefe der Frostfront wird geringfügig unterschätzt.

Für die Analyse der Übereinstimmung der Lösungen, wird die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (Root Mean Square Error – RMSE) berechnet. Die ergibt sich nach Gleichung (48).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2} \quad (48)$$

Mit

$x_{1,i}$  = Wert der Berechnung 1 [-]

$x_{2,i}$  = korrespondierender Wert der Berechnung 2 [-]

Für die obige Simulation (Abbildung 65) ergibt sich ein RMSE von 1,6 %. Somit wird bestätigt, dass eine gute Übereinstimmung vorliegt.

Die Problemstellung entspricht nicht dem Anwendungsziel der Simulationsrechnung. Hierfür wird eine deutlich geringere Porosität angesetzt und als Vergleich herangezogen. Um hierfür einen analytischen Abgleich zu realisieren, müssen die thermischen Diffusivitäten in der Gleichung den geänderten Randbedingungen angepasst werden, da nun nicht nur Wasser vorhanden ist, sondern eine Bodenmatrix. Die Diffusivitäten werden nach Mottaghy & Rath [2006] definiert. Die Gleichungen (49) und (50) beschreiben die thermischen Diffusivitäten des Wassers und des Eises.

$$a_{\text{water}} = \frac{(\varepsilon \cdot \sqrt{\lambda_{\text{water}}} + (1 - \varepsilon) \cdot \sqrt{\lambda_{\text{soil}}})^2}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{water}} \cdot c_{\text{water}} + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{\text{soil}} \cdot c_{\text{soil}} + \rho_{\text{water}} \cdot LF \cdot \frac{\partial S_{\text{water}}}{\partial T}} \quad (49)$$

$$a_{\text{ice}} = \frac{(\varepsilon \cdot \sqrt{\lambda_{\text{ice}}} + (1 - \varepsilon) \cdot \sqrt{\lambda_{\text{soil}}})^2}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{ice}} \cdot c_{\text{ice}} + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{\text{soil}} \cdot c_{\text{soil}}} \quad (50)$$

Über diese Definitionen werden die thermischen Eigenschaften der Bodenanteile in die Diffusivitäten integriert und über das geometrische Mittel gewichtet. Das Ergebnis einer Vergleichsrechnung mit einer Porosität von  $\varepsilon = 0,05$  ist nachfolgender Abbildung 66 zu entnehmen.

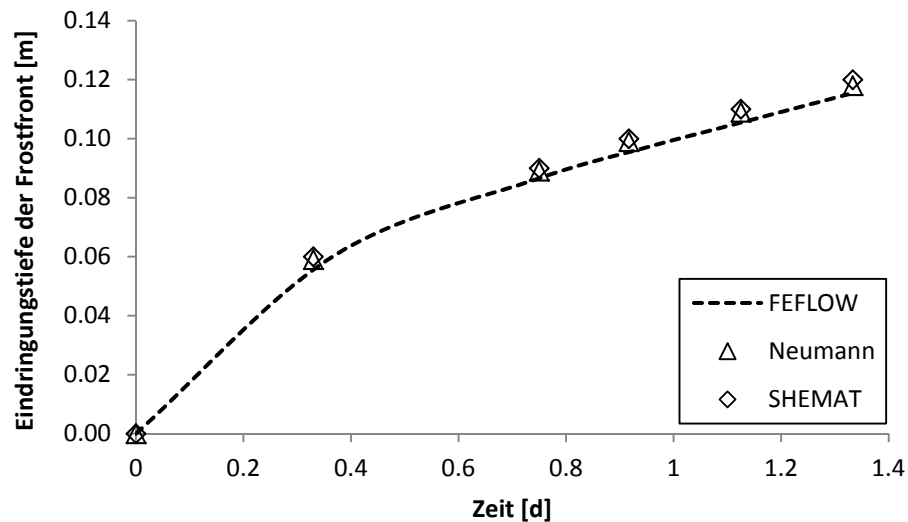


Abbildung 66: Vergleich der FEFLOW Lösung mit der analytischen Neumann Lösung und einer numerischen Lösung mit SHEMAT [Mottaghy & Rath 2006]. Modellparameter: Exponentielle Übergangsfunktion mit  $w = 1,0$ , Porosität  $\varepsilon = 0,05$ ,  $T_{\text{water}} = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{ice}} = -2^\circ\text{C}$ ,  $T_0 = -3^\circ\text{C}$ . [verändert nach Anbergen et al. 2014b]

Es ist ersichtlich, dass bei der geringeren Porosität, das entwickelte FEFLOW Plug-In vergleichbare Ergebnisse, wie die der analytischen und SHEMAT Lösung liefert. Es kann die analytische Neumann-Lösung mit dem Plug-In zuverlässig simuliert werden. Der RMSE beträgt 0,4 % und bestätigt die gute Übereinstimmung.

### 6.4.3 Lunardini-Lösung

Eine analytische Lösung für komplexere Modelle hat Lunardini [1988] veröffentlicht. Dabei kann die Ausgangstemperatur  $T_{initial}$  einen anderen Wert als  $T_{water}$  annehmen und es können die Ortskoordinaten der Grenztemperaturen  $T_{water}$  und  $T_{ice}$  berechnet werden. Wiederum wird in der folgenden Betrachtung von einer vollständigen Phasenumwandlung des Wassers zu Eis ausgegangen.

So wird die Ortskoordinate von  $T_{ice}$  nach Gleichung (51) berechnet.

$$X_{ice,L}(t) = 2 \cdot \gamma_L \cdot \sqrt{\alpha_{ice,L} \cdot t} \quad (51)$$

Mit

$X_{ice,L}$  = Ortskoordinate von  $T_i$  [m]

$\gamma_L$  = Formfaktor [-]

$\alpha_{ice,L}$  = thermische Diffusivität des Eises nach Lunardini [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]

Die thermische Diffusivität  $\alpha_{ice,L}$  des Eises berechnet sich in diesem Fall nach Gleichung (52).

$$\alpha_{ice,L} = \frac{\varepsilon \cdot \lambda_{ice} + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_{soil}}{\varepsilon \cdot \rho_{ice} \cdot c_{ice} + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{soil} \cdot c_{soil}} \quad (52)$$

Die thermische Diffusivität  $\alpha_{water,L}$  des Wassers berechnet sich analog nach Gleichung (53).

$$\alpha_{water,L} = \frac{\varepsilon \cdot \lambda_{water} + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_{soil}}{\varepsilon \cdot \rho_{ice} \cdot c_{water} + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{soil} \cdot c_{soil}} \quad (53)$$

Dabei ist besonders zu beachten, dass bei diesem Ansatz von einem gewichteten arithmetischen Mittel ausgegangen wird, also wie in FEFLOW. Die Ortskoordinate von  $T_w$  berechnet sich nach Gleichung (54).



$$X_{water,L}(t) = 2 \cdot \psi_L \cdot \sqrt{\alpha_{ice/water,L} \cdot t} \quad (54)$$

Mit

$X_{water,L}$  = Ortskoordinate von  $T_i$  [m]

$\psi_L$  = Formfaktor [-]

$\alpha_{ice/water,L}$  = therm. Diffusivität des Wasser-Eis-Gemisches nach Lunardini [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]

Die thermische Diffusivität  $\alpha_{ice/water,L}$  des Wasser-Eis-Gemisch wird nach Gleichung (55) ermittelt.

$$\alpha_{ice/water,L} = \frac{\varepsilon \cdot (S_{ice} \cdot \lambda_{ice} + S_{water} \cdot \lambda_{water}) + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_{soil}}{\varepsilon \cdot (S_{ice} \cdot \rho_{ice} \cdot c_{ice} + S_{water} \cdot \rho_{water} \cdot c_{water}) + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{soil} \cdot c_{soil}} \quad (55)$$

Die effektiven Wärmeleitfähigkeiten der gefrorenen und der flüssigen Bodenmatrix errechnen sich für die einzelnen Fälle basierend auf Gleichung (28) nach den Gleichungen (56) und (57).

$$\lambda_{ice,L} = \varepsilon \cdot \lambda_{ice} + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_{soil} \quad (56)$$

$$\lambda_{water,L} = \varepsilon \cdot \lambda_{water} + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_{soil} \quad (57)$$

In dem Übergangsbereich wird die effektive Wärmeleitfähigkeit des Wasser-Eis-Gemisches nach Gleichung (58) berechnet.

$$\lambda_{eff}(T) = S_{water}(T) \cdot \lambda_{water} + S_{ice}(T) \cdot \lambda_{ice} \quad (58)$$

Die Formfaktoren  $\psi_L$  und  $\gamma_L$  werden über zwei transzendente Gleichungen simultan bestimmt [McKenzie et al. 2007].

$$\frac{(T_{ice} - T_0)}{(T_{ice} - T_{water})} \cdot e^{-\psi^2 \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{ice/water,L}}{\alpha_4}\right)} = \frac{\frac{\lambda_{eff}(T)}{\lambda_{ice,L}} \sqrt{\frac{\alpha_{ice/water,L}}{\alpha_4}} \operatorname{erf}(\psi)}{\operatorname{erf}(\gamma_L) - \operatorname{erf}\left(\psi \sqrt{\frac{\alpha_{ice/water,L}}{\alpha_4}}\right)} \quad (59)$$

$$\frac{(T_{ice} - T_{water}) \frac{\lambda_{eff}(T)}{\lambda_{water,L}}}{(T_{initial} - T_{water})} \sqrt{\frac{\alpha_{water,L}}{\alpha_4}} \cdot e^{-\psi^2 \cdot \left(1 - \frac{\alpha_4}{\alpha_{water,L}}\right)} = \frac{\operatorname{erf}(\gamma) - \operatorname{erf}\left(\psi \sqrt{\frac{\alpha_{ice/water,L}}{\alpha_4}}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\gamma \sqrt{\frac{\alpha_4}{\alpha_{water,L}}}\right)} \quad (60)$$

Zum Vergleich mit der dargestellten analytischen Lösung wird das Modell an die Werte von McKenzie et al. [2007] angepasst. Die verwendeten Parameter sind in der Tabelle 13 aufgelistet. Diese werden ebenfalls weitestgehend für die später folgenden Parameterstudien verwendet.

Das Modell hat eine Anfangstemperatur von vier Grad Celsius und wird einseitig durch  $T_0 = -6^\circ\text{C}$  abgekühlt. Im nachfolgenden Anwendungsfall wurde ein Gefrierintervall von vier Kelvin mit einer Grenztemperatur von  $T_{ice} = -4^\circ\text{C}$  gewählt.

Tabelle 13: Parameter für die Modellierung des Modells nach McKenzie et al. [2007] zum Abgleich mit der Lösung nach Lunardini und den Parameterstudien.

Parameter	FEFLOW	Einheit
Grav. Wärmekapazität des Fluides	4 187	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit des Fluides	variable <sup>a</sup>	$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Dichte des Fluides	variable <sup>b</sup>	$\text{kg m}^{-3}$
Grav. Wärmekapazität des Eises	variable <sup>a</sup>	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit des Eises	variable <sup>a</sup>	$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Dichte des Eises	920	$\text{kg m}^{-3}$
Vol. Wärmekapazität des Gebirges	2.18	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit des Gebirges	2.9	$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Porosität	0.05 <sup>d</sup>	-
Hydraulische Durchlässigkeit	$6.5 \times 10^{-4}$ <sup>c</sup>	$\text{m s}^{-1}$
Latentwärme	334 000	$\text{J kg}^{-1}$
Maximale Zeitschritt gröÙe	0.25	h
Totale Simulationszeit	1	d

*a Die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität werden nach den Ansätzen von Alexiades & Solomon [1993] berechnet, b für die Validierung abschnittsweise konstant, c variabel unter  $0.0^\circ\text{C}$ , d variiert je nach Modellansatz*

Der zeitliche Verlauf der Ortskoordinate von  $T_{water}$  ist in folgender Abbildung 67 dargestellt.

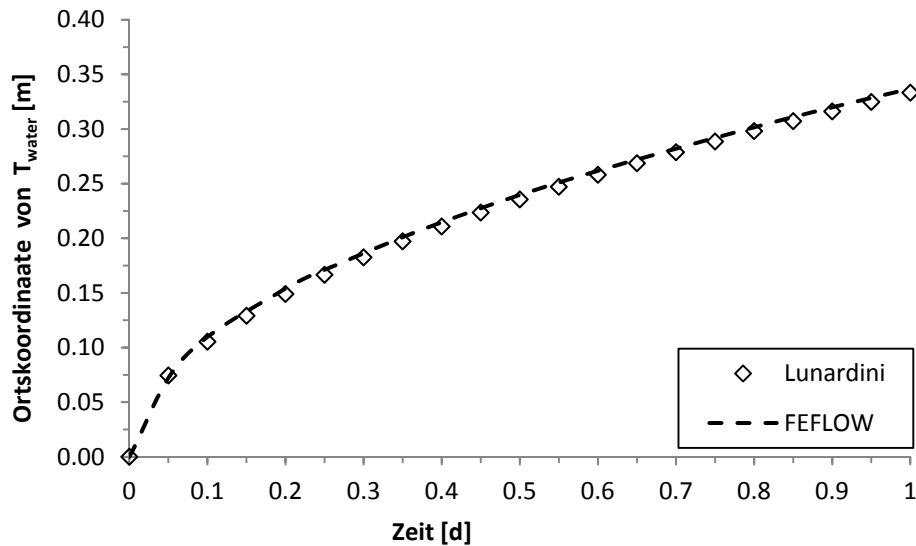


Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der Ortskoordinate der Temperatur  $T_{\text{water}}$  nach Lunardini [McKenzie et al., 2007] und als Ergebnis der numerischen Simulation mit FEFLOW

Es ist zu erkennen, dass das FEFLOW Modell sehr gut mit der analytischen Lösung übereinstimmt. Der RMSE beträgt 0,9 %. Das Temperaturprofil in dem Modell nach einem Tag Simulationszeit ist der Abbildung 68 zu entnehmen.

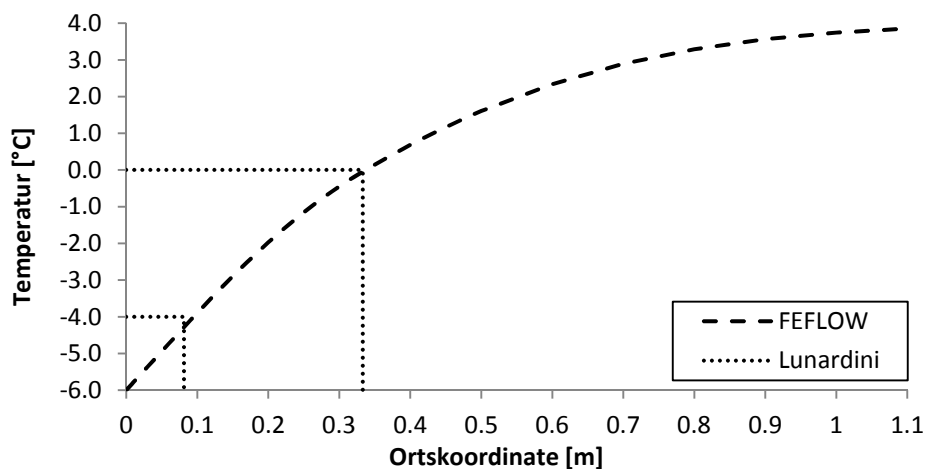


Abbildung 68: Temperaturprofil nach einer Simulationszeit von 24 Stunden. Die gepunkteten Linien definieren die Grenztemperaturen  $T_{\text{ice}}$  und  $T_{\text{water}}$  der Lunardini Lösung nach McKenzie et al [2007], die gestrichelte Linie definiert die berechneten Temperaturen [verändert nach Anbergen et al., 2014b]

Die beiden Grenztemperaturen  $T_{\text{water}}$  und  $T_{\text{ice}}$  werden in einer hohen Genauigkeit simuliert, so dass von einer zuverlässigen und realitätsnahen Abbildung der Temperaturprofile in porösen Medien durch das programmierte Plug-In ausgegangen werden kann.

#### 6.4.4 Parameterstudien

Als Plausibilitätskontrolle wurden Parameterstudien an dem Kalibrierungsmodell durchgeführt. Für die Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen, wurden die thermischen Randbedingungen des Modells (Abbildung 64) angepasst und variiert. Eine Auswahl der Ergebnisse wird im Folgenden dargestellt. In der Abbildung 69 sind exemplarisch die Temperaturverteilung und die Modifikation ausgewählter Materialparameter an einem Modellausschnitt visualisiert.

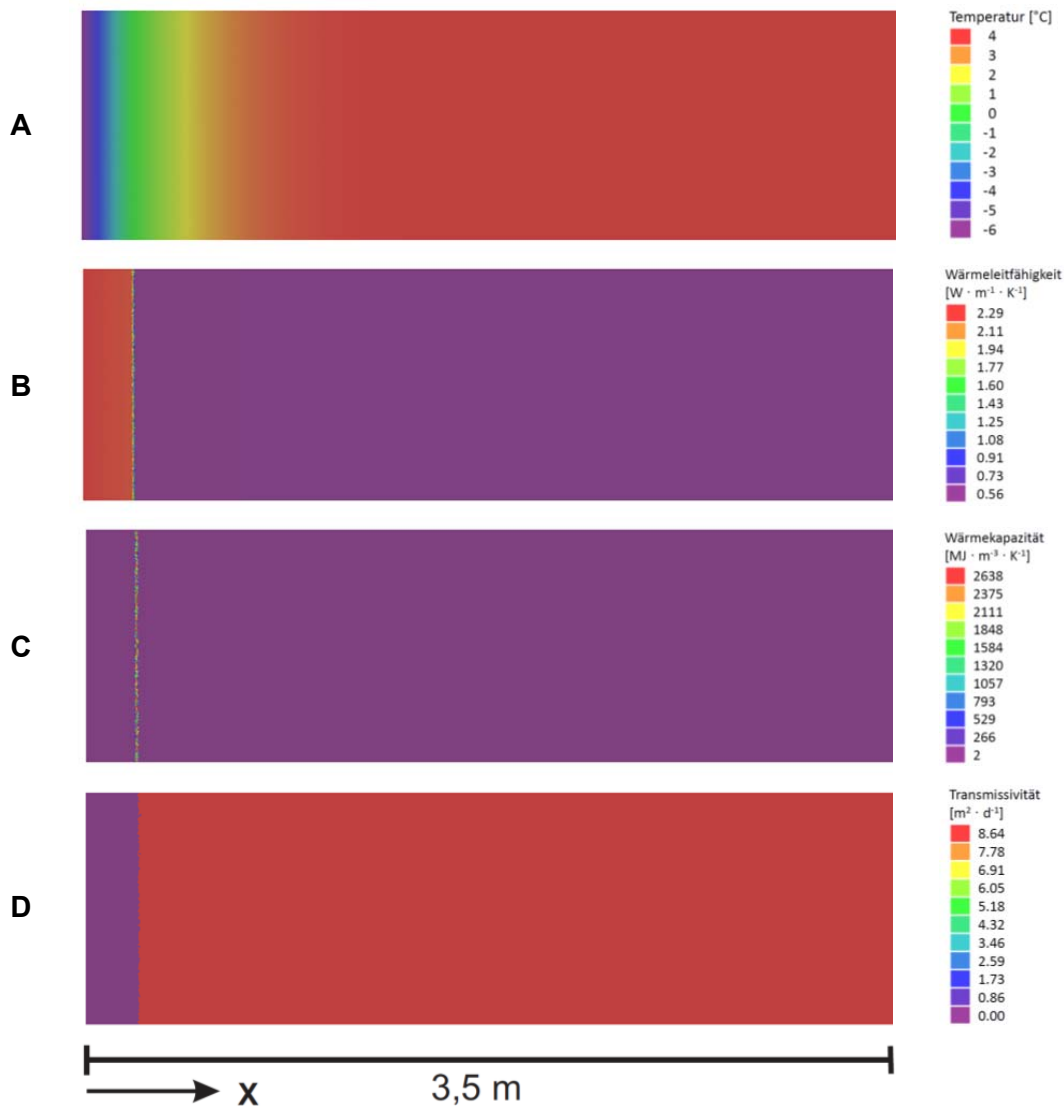


Abbildung 69: Exemplarische Darstellung der örtlichen Verteilung der Temperatur (A), der modifizierten Wärmeleitfähigkeit des Wassers (B), der modifizierten volumetrischen Wärmekapazität des Wassers (C) und der modifizierten Durchlässigkeit der Matrix (D) der FEFLOW Simulation. 24 Stunden Simulationszeit, exponentielle Übergangsfunktion mit  $w = 0,5$  und  $\varepsilon = 0,05$  [Anbergen et al., 2014b].

In der Abbildung 69 ist zu erkennen, dass sich die Temperaturabsenkung bei den vorgegebenen Randbedingungen auf den linken Bereich des Modells bezieht (A). Damit

wird der Forderung nach einem semi-infiniten Halbraum erfüllt. Weiterhin ist die scharfe Begrenzung des Übergangsbereiches, dem Gefrierintervall, durch die Änderung der Materialeigenschaften zu erkennen (B, C, D). Bei der Wärmeleitfähigkeit kann eindeutig die niedrigere Wärmeleitfähigkeit des flüssigen Wassers von der höheren des Eises unterschieden werden. Ebenso ist in (D) zu erkennen, dass bei  $T_{water} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  die Durchlässigkeit der Struktur für den negativen Celsiusbereich schlagartig auf nahezu null gesetzt wird.

Die FEFLOW Ergebnisse stimmen mit den Programmierungen des Plug-Ins überein und sind konsistent. Besonders markant ist dabei die Wärmekapazität des Fluides. Durch das Plug-In wird in dem Bereich des Phasenwechsels die Wärmekapazität stark erhöht. Die Freisetzung der Latentwärme kann in (C) beobachtet werden.

Die Abbildung 70 zeigt einen Vergleich unterschiedlicher Simulationsparameter an demselben Modell. Dabei wurden die thermischen Berechnungen sowohl mit dem linearen Übergangsmodell, als auch mit dem exponentiellen Modell durchgeführt. Weiterhin wurde eine Berechnung ohne Einbindung des Plug-Ins durchgeführt und eine mit dem linearen Plug-In bei dem als Sonderlösung der Latentwärmeanteil nicht mit einbezogen wurde.

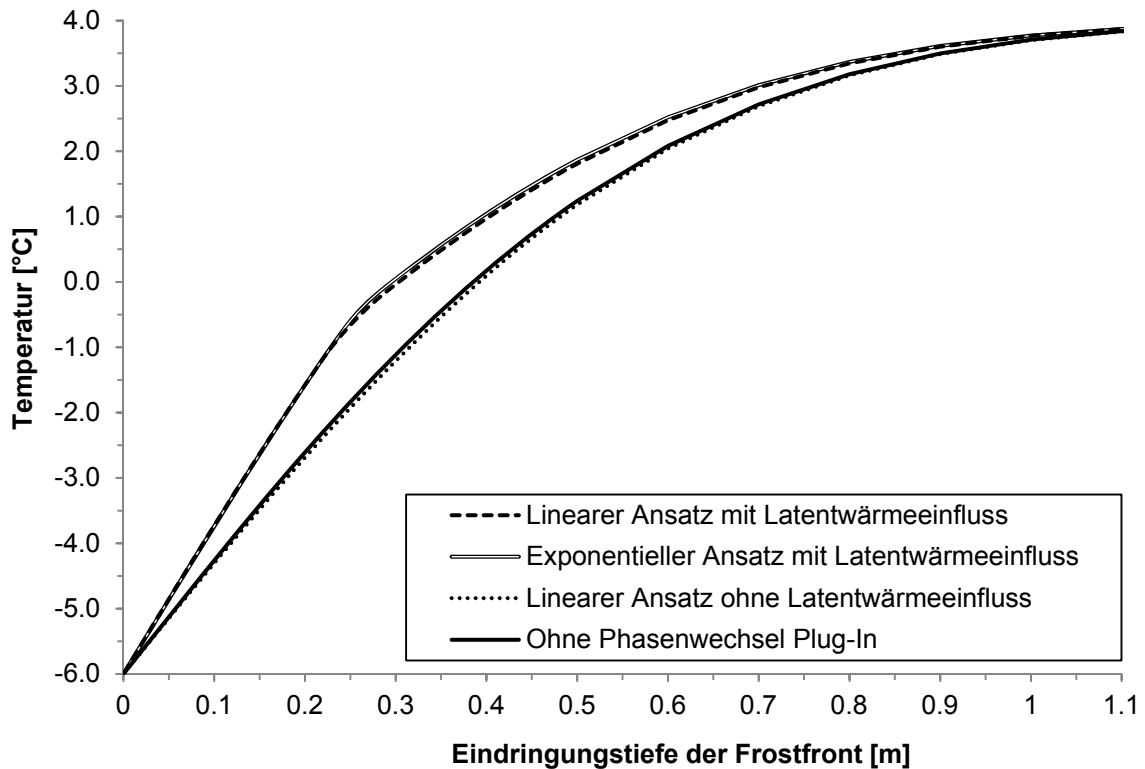


Abbildung 70: Temperaturverteilung im Kalibrierungsmodell nach 24 Stunden in Abhängigkeit der implementierten Phasenwechselmodelle (Gefrierintervall 1 K linear,  $w = 0,5$  exponentieller Ansatz). Porosität  $\varepsilon = 0,05$ . Der Einfluss der Latentwärme bewirkt ein langsames Voranschreiten der Frostfront, als ohne Latentwärmeeinflüsse [Anbergen et al. 2014b].

Es ist ersichtlich, dass die beiden verglichenen linearen und exponentiellen Ansätze in dieser Konfiguration, annähernd identische Ergebnisse liefern. Ein Vergleich zu den Verläufen der Übergangsfunktionen (Abbildung 59) unterstützt dieses Ergebnis, als dass deren Formen und Steigungen in einem ähnlichen Bereich liegen. Simulationen ohne Phasenübergang oder ohne Einbeziehung der Latentwärmeeinflüsse zeigen eine tiefere Eindringung der Frostfront. Dies ist aufgrund der geringeren Wärmekapazität im Bereich des Phasenübergangs plausibel. Der Einfluss der erhöhten Wärmeleitfähigkeit des Eises ist bei der vorgegebenen Simulationszeit und der geringen Porosität erwartungsgemäß gering. Ein Vergleich unterschiedlicher Porositäten auf die Temperaturänderung in einem Modell mit ansonsten gleichen Randbedingungen ist der Abbildung 71 zu entnehmen.

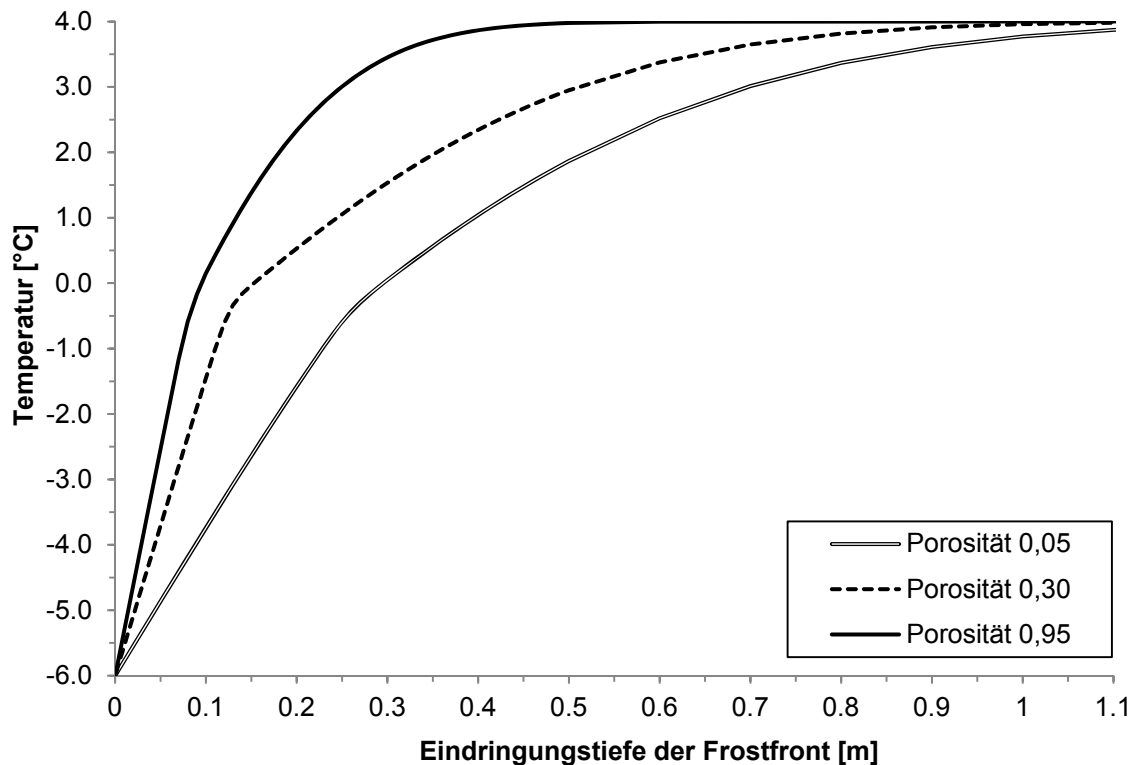


Abbildung 71: Gegenüberstellung des Einflusses der Porosität auf die Temperaturverteilung im Kalibrierungsmodell mit Latentwärmeeinfluss nach 24 Stunden. Linearer Phasenübergang mit einem Gefrierintervall von 1 K [nach Anbergen et al. 2014b]

Es ist ersichtlich, dass sich die Eindringungsgeschwindigkeit der Frostfront bei einem zunehmenden Wasseranteil verringert. Dies ist zum einen mit dem absolut größer werdenden Anteil der Latentwärme zu erklären, welcher dem System durch den Phasenwechsel zugeführt wird. Zum anderen ist die effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eff}$  geringer, da mehr Wasser in dem System ist, welches eine geringere Wärmeleitfähigkeit als die Matrix besitzt, sowohl in der flüssigen als auch in der festen Phase. Folglich ist das oben abgebildete Ergebnis plausibel und bestätigt das grundsätzliche physikalische Verhalten [Aldrich & Paynter, 1953].

Das vorliegende Plug-In ist so konzipiert, dass sowohl Durchfrostungs-, als auch Auftauvorgänge simuliert werden können. Dabei wird die gängige Annahme getroffen, dass der Latentwärmeanteil des Erstarrens und des Schmelzens annähernd gleich sind [Turcotte & Schubert, 1982, Mottaghy & Rath, 2006, McKenzie et al., 2007]. Abbildung 72 zeigt eine Gegenüberstellung des Auftau- und des Durchfrostungsprozesses. Die Randbedingungen für die beiden Simulationen sind bis auf die Temperaturen identisch. Für die Auftausimulation wurde die Ausgangstemperatur auf  $-4\text{ °C}$  gesetzt und das System linksseitig durch  $+6\text{ °C}$  erwärmt.

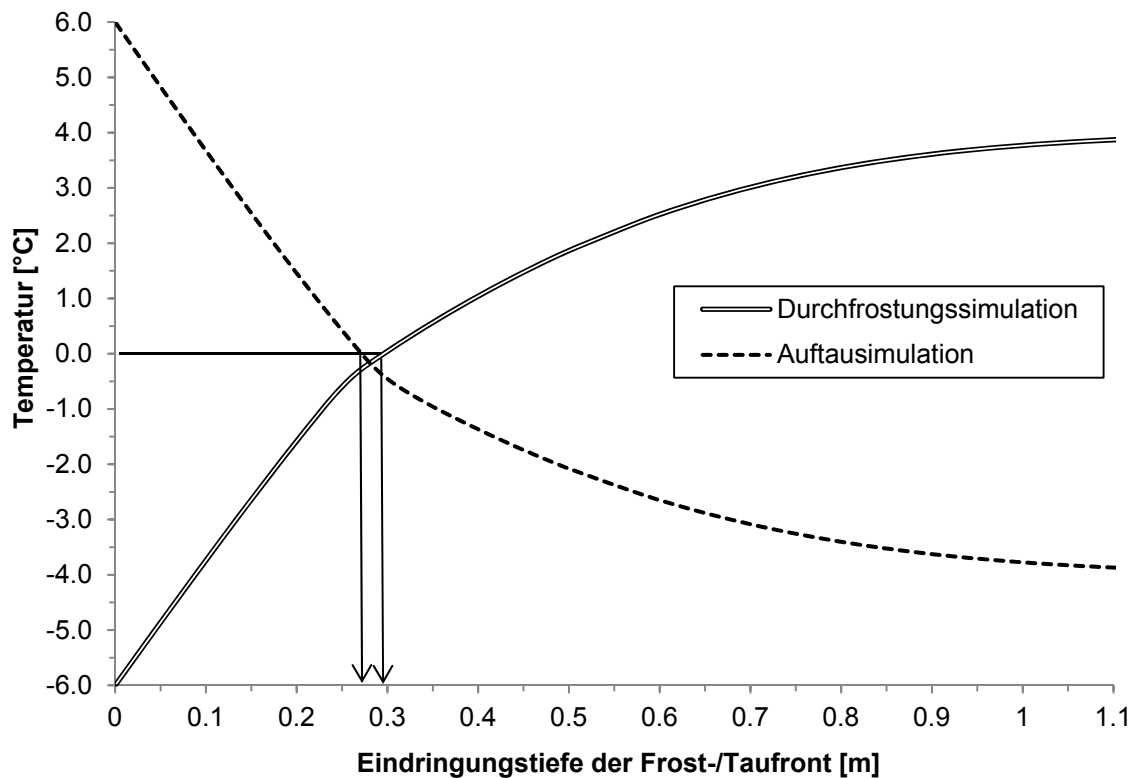


Abbildung 72: Gegenüberstellung des Frost- und des Tauzyklus unter Latentwärmeeinfluss nach 24 Stunden. Porosität  $\varepsilon = 0,05$ ,  $T_i = -1\text{ °C}$ ,  $T_{\text{water}} = 0\text{ °C}$ . Linearer Ansatz. [nach Anbergen et al., 2014b].

Wie aus Abbildung 72 zu erkennen, sind die beiden Temperaturprofile erwartungsgemäß annähernd achsensymmetrisch zur  $0\text{ °C}$ -Horizontalen. Der Versatz, dass der Auftauvorgang langsamer stattfindet, ist darin begründet, dass das Gefrierintervall zwischen  $0\text{ °C}$  und  $-1\text{ °C}$  liegt. Damit ist die zu überbrückende Temperaturdifferenz, bis zur Freisetzung der Latentwärme, bei dem Auftauvorgang geringer als bei dem Gefriervorgang. Die Simulation zeigt, dass sowohl Durchfrostungs- als auch Auftauprozesse stabil abgebildet werden können.

Weitere Ergebnisse der Parameterstudien sind in Anbergen et al. [2014b] veröffentlicht. Der Quellcode für das Plug-In kann dem Anhang B entnommen werden.

## 6.5 Ergebnis der Finite Elemente Berechnung der Temperaturverteilung

Das validierte Plug-In wurde für die Berechnung der Durchfrostungszeiten und der Temperaturprofile in den Prüfkörpern während der Versuchsdurchführung der FTW-



Versuche eingesetzt. Das aufgestellte Modell und der Ort der aufgezeichneten und simulierten Temperaturen ist der Abbildung 73 zu entnehmen.

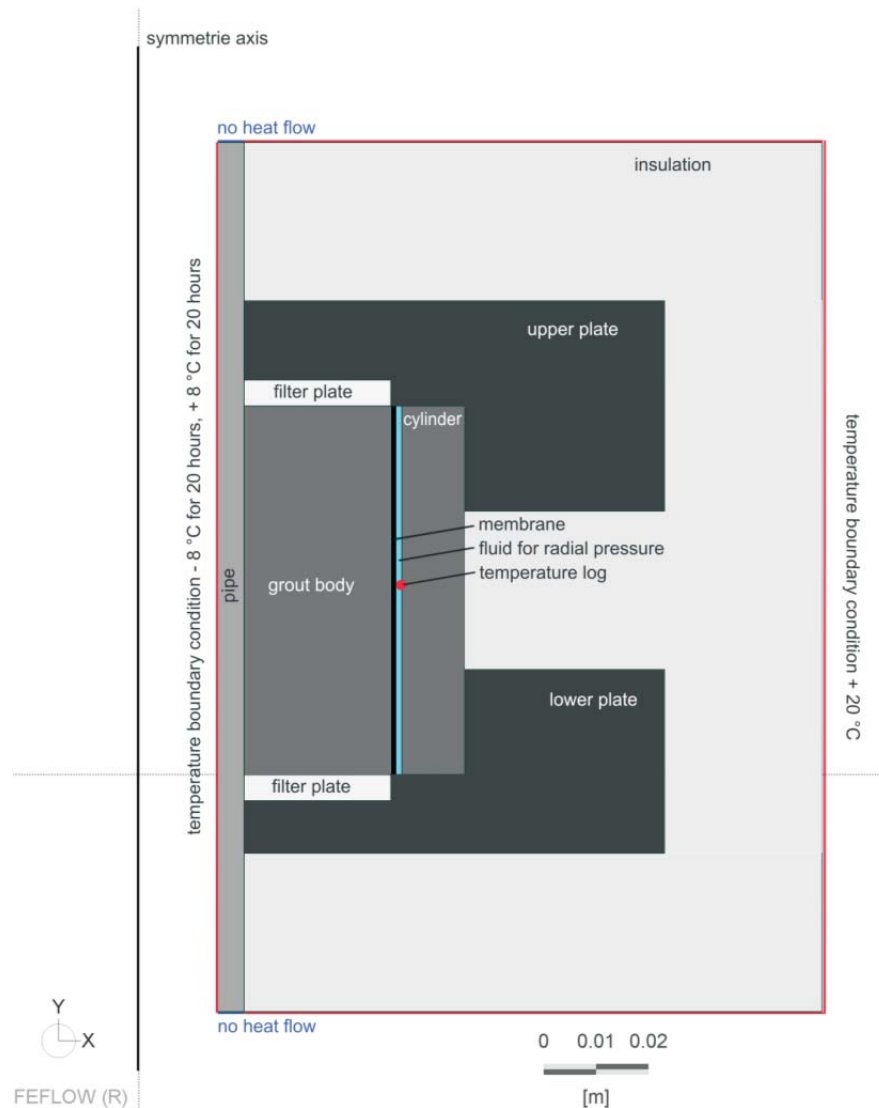


Abbildung 73: Schematische Darstellung des Modellaufbaus für die thermische Berechnung eines Frost-Tau-Wechsels in der entwickelten Messzelle [Anbergen et al., 2014b]

Das Modell entspricht dem axialsymmetrischen Aufbau der Messzellen und der angebrachten Isolierung während der Temperierung. Die maßgeblichen Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten können der Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Materialeigenschaften für die thermische Berechnung eines Frost-Tau-Wechsels in der entwickelten Messzelle [Anbergen et al., 2014b]

Material	Porosität [-]	Wärmeleitfähigkeit [J s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Vol. Wärmekapazität [MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
Sondenrohr	1 · 10 <sup>-6</sup>	0,40	1,900
Hinterfüllmaterial	0.60	2,00	4,560
Filterplatte	0.54	60,00	3,318
Kopf- und Fußplatte	1 · 10 <sup>-6</sup>	0,17	2,100
Membran	1 · 10 <sup>-6</sup>	0,16	1,587
Isolation	1 · 10 <sup>-6</sup>	0,04	0,066

Die Simulationsparameter sind in der Tabelle 15 aufgelistet.

Tabelle 15: Simulationsparameter für die thermische Berechnung eines Frost-Tau-Wechsels in der entwickelten Messzelle [Anbergen et al., 2014b]

Eigenschaft	Wert
Anzahl Knoten	22320
Anzahl Elemente	44054
Elementtyp	Dreieck
Dimension	2D achsensymmetrisch
Kopplungstyp	coupled flow and heat transport
Geometrie	
Breite	0,115 m
Höhe	0,165 m
Max Zeitschrittlänge	0,25 h
Simulationszeit	40 h

Mit diesen Parametern wurde die Temperaturentwicklung mit der Zeit an dem in Abbildung 73 dargestellten Messpunkt simuliert. Dabei wurde zum einen die Simulation mit dem entwickelten FEFLOW Plug-In durchgeführt und zum anderen ohne Aktivierung des Plug-Ins. Die Simulationsergebnisse mit einer Gegenüberstellung zu je einer Temperaturaufzeichnung<sup>8</sup> an drei Messzellen ist der Abbildung 74 zu entnehmen.

<sup>8</sup> Temperaturaufzeichnung mit einem Datalogger der Fa. UniTherm Messtechnik, Messfühler Typ-K, Geräteauflösung: ±0,1 %±0,7 °C.

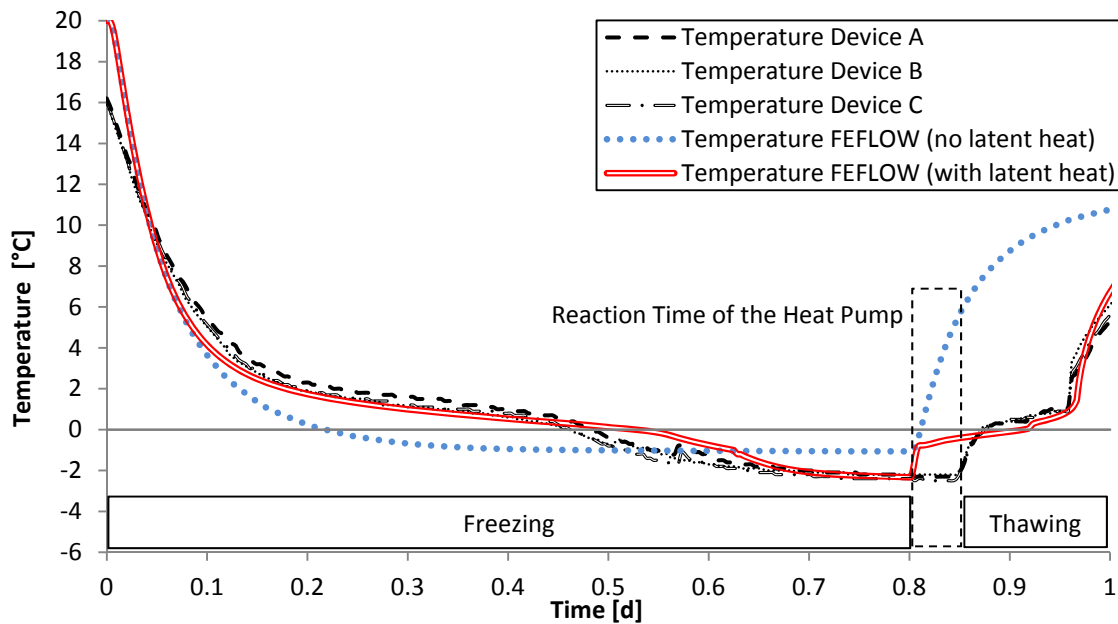


Abbildung 74: Temperatur am äußeren Rand des Prüfkörpers in Abhängigkeit der Versuchszeit. Messung in drei Messzellen, Simulation mit FEFLOW mit und ohne Inkorporation des Phasenwechsels [Anbergen et al., 2014b].

Die gemessenen Temperaturen der drei Messzellen weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Das bestätigt, dass die Temperierkreisläufe der Messzellen hydraulisch abgeglichen sind und eine gleiche Wärmeentzugsleistung erfahren, wie es in der Auslegung angenommen wurde. Die Verläufe weisen eindeutige Latentwärmeeinflüsse auf [Anbergen et al. 2014a], sowohl bei der Durchfrostung, als auch bei dem Tautvorgang. Diese äußern sich als sattelpunktähnlicher Kurvenverlauf im Bereich des Phasenwechsels.

Die FEFLOW Simulation ohne Verwendung des Plug-Ins (blaue Punktlinie) weist keine derartige Charakteristik auf, sondern erreicht zügig einen asymptotischen Temperaturverlauf, welcher auf einen erreichten stationären Zustand schließen lässt. Im Gegensatz dazu, simuliert FEFLOW unter Anwendung des Plug-Ins (rote Linie) den gemessenen Temperaturverlauf mit einer hohen Übereinstimmung. Der Versatz im Bereich des Umschaltens des Thermostaten (0,8 Tage), ist in dem trägen Temperierverhalten begründet. Das numerische Modell rechnet hier mit einem schlagartigen Temperaturwechsel, dessen Auswirkungen mit dem direkten Anstieg der Temperatur in der Grafik ersichtlich sind.

Ein Abgleich der gemessenen Temperaturen mit den thermographisch ermittelten (Kap. 5.7) und den simulierten ist in Tabelle 15 dargestellt.

*Tabelle 16: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Temperaturwerte an der Außenseite der Prüfkörper nach 1, 4 und 17 h [verändert nach Anbergen et al., 2014b]*

<b>Versuchszeit [h]</b>	<b>FEFLOW [°C]</b>	<b>Temperaturmessung [°C]</b>	<b>Thermographie<sup>a</sup> [°C]</b>
<b>1</b>	10,3	10,3	9,3
<b>4</b>	2,2	2,5	2,8
<b>17</b>	-2,1	-2,2	-2,6

<sup>a</sup> Die angegebenen Werte sind Auswertungen der Software. Aufgrund der Messungengenauigkeit des Verfahrens und der Apparatur sind diese Werte als Anhaltswerte zu verstehen.

Es ist aus der obigen Tabelle ersichtlich, dass die Temperaturen in einem gleichen Bereich liegen, was die Richtigkeit der angewendeten Ansätze und Verfahren bestärkt.

## 6.6 Bewertung der numerischen Validierung

Das entwickelte Plug-In simuliert zuverlässig die analytischen Lösungen (Neumann und Lunardini). Ein Vergleich der analytischen Lösungen zu den Ergebnissen der FEFLOW Simulation und Simulationen mit SHEMAT und SUTRA-ICE zeigt eine hohe Übereinstimmung. Durch die Parameterstudien konnten die Simulationsergebnisse plausibilisiert werden. Das Plug-In ist in der Lage sowohl Durchfrostungs- aus auch Auftauvorgänge zu simulieren.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass unter Verwendung des Plug-Ins die Simulation der Temperaturverteilung in der Messzelle während des Betriebes mit realitätsnahen Ergebnissen möglich ist. Es konnte neben dem messtechnischen Nachweis auch ein numerischer Nachweis des Absinkens der Temperatur unter null Grad Celsius, bis zum äußeren Rand des Prüfkörpers hin, geführt werden.

## **7 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN AN HINTERFÜLLMATERIALIEN**

### **7.1 Versuche an Hinterfüllbaustoffen**

Das vorgestellte Prüfverfahren ist für die Untersuchung der Eignung von Hinterfüllbaustoffen für EWS im FTW-Einsatz entwickelt worden. Seine Funktionalität wurde in Kap. 0 und 6 belegt. In einem weiteren Schritt wird nun die Anwendung des Prüfverfahrens für Eignungsuntersuchungen diskutiert. Grundsätzlich ist dabei zu beachten, dass mit dem Prüfverfahren stets die Systemdurchlässigkeit gemessen wird. So können über die Untersuchungen zwei wesentliche Fragestellungen bezüglich des geprüften Hinterfüllmaterials evaluiert werden:

- 1) Ist das Hinterfüllmaterial in der Lage eine hydraulisch integrale Ringraumfüllung herzustellen? Welche Systemdurchlässigkeiten sind zu erwarten?
- 2) Wird die hydraulische Sperrfunktion der Hinterfüllung durch zyklische Frost-Tau-Belastungen beeinflusst? Welche Systemdurchlässigkeiten sind nach FTW zu erwarten?

Die Eignung des Prüfverfahrens wird nachfolgend im Hinblick auf diese beiden Fragestellungen auf Grundlage eines breit angelegten Versuchsprogramms diskutiert. Die Ergebnisse werden anschließend mit denen anderer Untersuchungen vergleichend gegenübergestellt und Gemeinsamkeiten und Unterschiede beleuchtet.

### **7.2 Charakterisierung der untersuchten Hinterfüllbaustoffe**

Wie auch bei den Vorversuchen wurden die Untersuchungen an Fertigprodukten durchgeführt, um so die Wahrscheinlichkeit möglicher Inhomogenitäten im Probenmaterial zu senken. Trotzdem sind schwankende Materialeigenschaften bei Naturprodukten immer einzukalkulieren. Die Materialeigenschaften können je nach Charge variieren. Großen Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben weiterhin die Arbeitsabläufe im Labor, wie der Prüfzeitpunkt, das Abbindemilieu und die Prüfdauer. Für das Versuchsprogramm wurden deshalb eigene Standards entwickelt, wie in Kap. 4.4 und 4.6 dargestellt. Einzelne Parameter (hier: Materialtyp und Abbindezeit) wurden gezielt variiert.

In der Tabelle 17 sind die durchgeführten Prüfserien, hinsichtlich der Produktnamen anonymisiert zusammengestellt. Es wurde jeder Prüfung ein Prüfcode aus drei Buchstaben zugewiesen. Dabei weist der erste Buchstabe des Prüfcodes den Hersteller und der zweite Buchstabe das Produkt aus. Der dritte Buchstabe weist die unterschiedlichen Abbindezeiten aus. Ergänzend genannt sind maßgebliche Prüfrandbedingungen sowie qualitative Produktspezifika bezüglich quellfähiger Tonanteile und thermisch verbessernder Zusätze.

Tabelle 17: Probenbezeichnung und Produktinformationen der geprüften Hinterfüllbaustoffe

Prüfcode	W/F-Wert [-]	Abbindezeit [d]	Quellfähige Tonanteile [-]	Thermische Verbesserung [-]	Anzahl der Prüfkörper [n]	Anzahl der FTW [n]
EEE	0,8	28	+	+	3	12
EEF	0,8	56	+	+	3	9
EEH	0,8	91	+	+	2	9
EFF	0,8	56	+	+	3	10
EGG	0,82	28	-	-	2	1
FFF	0,7	28	-	-	3	6
FFK	0,7	56	-	-	3	6
FGG	0,7	56	-	-	2	3
FJJ	0,32	56	-	+	3	10
GHH	0,55	28	-	+	3	6
GHJ	0,55	56	-	+	3	6
GGG	0,7	28	+	+	3	5
GGH	0,58	56	+	+	2	6
HHH	0,6	28	+	+	3	6
HHK	0,6	56	+	+	3	6
JJJ	0,25	28	+	+	3	2
JJK	0,33	28	+	+	2	6
JKK	0,33	28	+	+	3	6
MMM	0,25	56	+	+	3	6
NNN	0,8	56	+	+	3	7
NOO	0,8	56	+	+	3	7
OOO	0,6	28	+	+	2	7
<b>Summe</b>			<b>15</b>	<b>18</b>	<b>60</b>	<b>142</b>

Die oben aufgelisteten 60 Prüfkörper wurden in der entwickelten Messapparatur geprüft und der Einfluss der FTW-Belastungen auf die hydraulische Systemdurchlässigkeit der Prüfkörper bestimmt. Die Anzahl der durchgeführten FTW-Simulationen variiert zum einen

aufgrund von Überprüfungen, ob die frostbedingte Änderung der Durchlässigkeit abgeklungen ist (maximale Änderung erreicht) und zum anderen aus laborablauftechnischen Gründen.

Die oben aufgeführten Prüfserien bestehen aus insgesamt 15 unterschiedlichen Hinterfüllbaustoffen. Diese spiegeln, für den Zeitraum der Prüfung, das Gros der auf dem deutschen Markt angebotenen Hinterfüllbaustoffe wieder. Die Produkte decken alle Hinterfüllbaustoffe der für das Jahr 2013 im Stadtgebiet Hamburg genehmigten EWS-Anlagen ab.

### **7.3 Ergebnisse der Frost-Tau-Wechsel-Untersuchungen**

In der Abbildung 75 sind die ermittelten Systemdurchlässigkeitsbeiwerte der Prüfserien aufgeführt, welche mindestens durch 6 FTW belastet wurden. Dargestellt ist die Systemdurchlässigkeit vor der ersten thermischen Belastung und die Systemdurchlässigkeit zum Ende der Prüfserie. Die Anzahl der Prüfkörper kann der obigen Tabelle 17 entnommen werden.

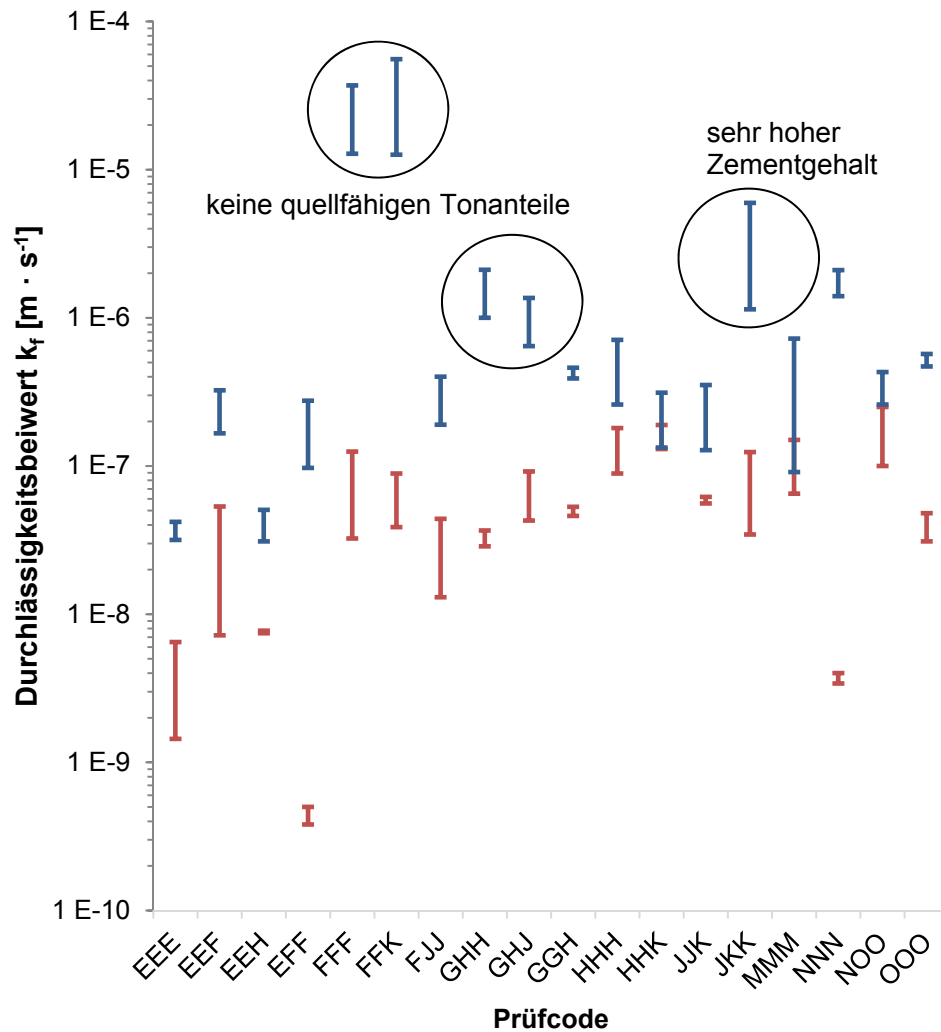


Abbildung 75: Systemdurchlässigkeitsbeiwerte der Prüfserien ohne FTW Belastung (dunkelrot) und mit mindestens 6 FTW-Belastungen (blau). Darstellung des Streuungsbereiches.

Es ist zu erkennen, dass das Gros der Messungen der Systemdurchlässigkeit ohne FTW Belastung in einem Bereich zwischen  $1 \cdot 10^{-8}$  und  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  liegt. Es wurden bei einigen Hinterfüllbaustoffen jedoch auch geringere Systemdurchlässigkeiten gemessen (EEE, EFF oder NNN), ebenso erhöhte Durchlässigkeiten (z.B. HHK oder NOO). Die Systemdurchlässigkeiten nach mehr als 6 FTW variieren stark je nach Material. Die Messungen der einzelnen Prüfserien streuen i.d.R. nur geringfügig. Dies bestätigt ein charakteristisches Materialverhalten.

Weiterhin ist ersichtlich, dass die Mehrzahl der Durchlässigkeiten nach der FTW-Beanspruchung in einem Bereich zwischen  $1 \cdot 10^{-7}$  und  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  liegen. Es existieren jedoch auch Prüfungen von Materialien, welche eine deutlich höhere, als auch niedrigere Durchlässigkeit erzielt haben. Die Ergebnisse der einzelnen Messreihen sowie



die Dokumentation der entstandenen Rissbilder nach der FTW-Simulation können dem Anhang A entnommen werden.

Eine Auswertung des Anstiegs der Medianwerte aufgrund der FTW verdeutlicht, dass der Anstieg materialspezifisch ist (Abbildung 76).

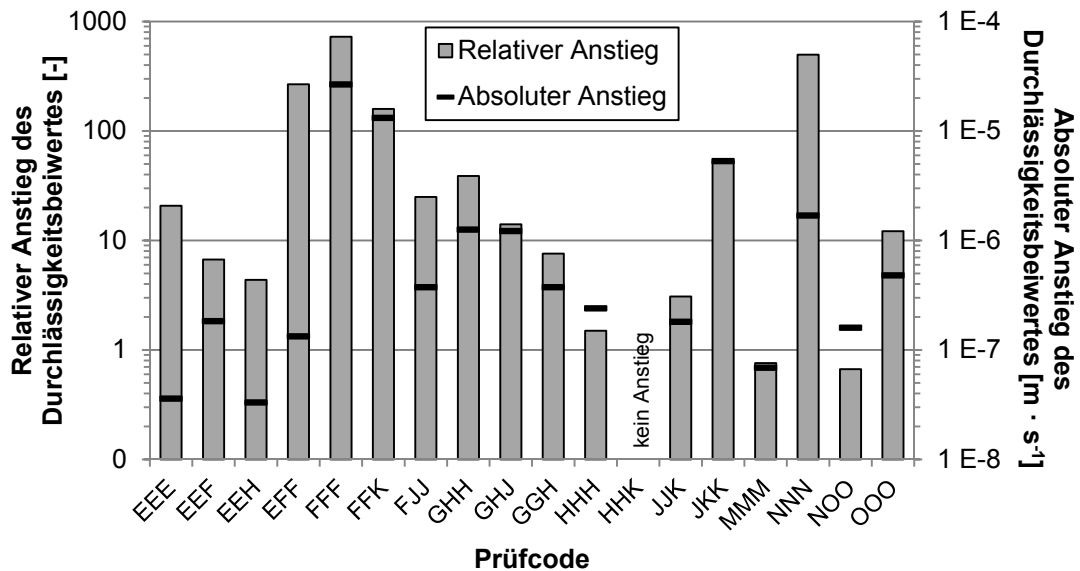


Abbildung 76: Anstieg der Systemdurchlässigkeitsbeiwerte der Prüfserien aufgrund zyklischer Frost-Tau-Belastungen. Relativer Anstieg (grau) und absoluter Anstieg (schwarz).

Der durch FTW induzierte Anstieg der Durchlässigkeit variiert materialabhängig. Die maximalen Anstiege liegen in einem Bereich um den Faktor 1000, wie z.B. bei den Produkten FF oder NN. Es gibt ebenso Materialien, die lediglich einen geringfügigen Anstieg verzeichnen (HH, MM oder NO). Bei der Prüfserie HHK konnte kein Anstieg der Medianwerte festgestellt werden. Die Materialien EF und NN weisen einen starken relativen Anstieg auf. Dieses liegt vor allem an der sehr schwach durchlässigen Systemdurchlässigkeit der Prüfkörper vor der ersten FTW Belastung. Dadurch führen auch absolut geringe Anstiege der Durchlässigkeit zu hohen relativen Anstiegen. So sind die Ergebnisse der Auswertung stets in Relation zu den tatsächlichen Systemdurchlässigkeiten (Abbildung 75) zu betrachten.

Eine Betrachtung unterschiedlicher Prüfserien mit Prüfkörpern des gleichen Materials, jedoch mit unterschiedlichem Probenalter, resp. Abbindezeitraum, ist der Abbildung 77 zu entnehmen. Die Prüfserien des gleichen Materials sind nach aufsteigendem Probenalter sortiert (vgl. Tabelle 17). Es ist ersichtlich, dass der relative Anstieg der Durchlässigkeit mit zunehmenden Probenalter abnimmt. Dieses umgekehrt proportionale Verhalten von Probenalter zum durch FTW induzierten relativen Anstieg der Durchlässigkeit bedeutet

ein gutmütiges Schadensverhalten von Hinterfüllungen von Erdwärmesonden. Je länger das Hinterfüllmaterial vor der ersten Frost-Tau-Belastung abbinden kann, desto geringer ist die Abnahme des Fließwiderstandes.

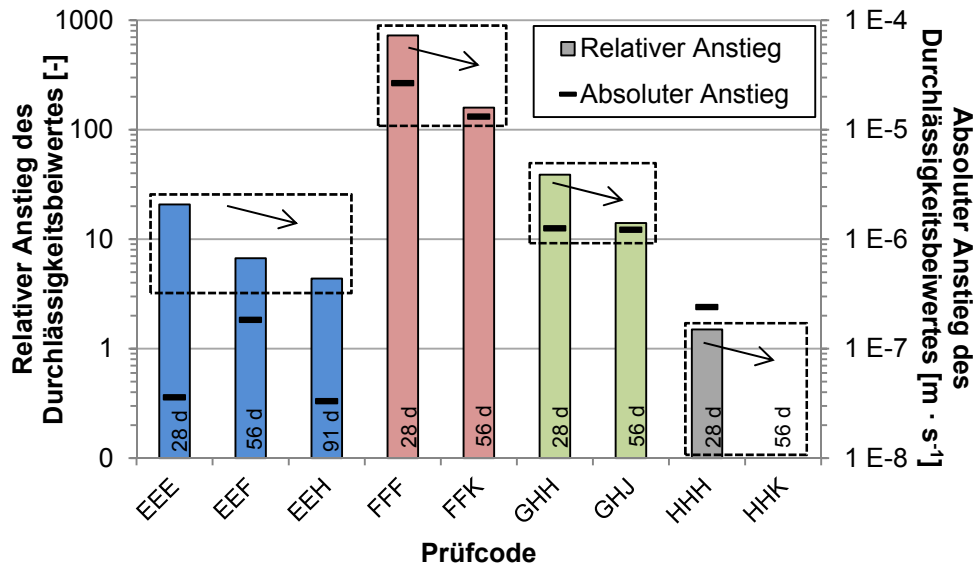


Abbildung 77: Gegenüberstellung des durch FTW induzierten Anstieges der Systemdurchlässigkeiten gleicher Materialien. Jede Farbe markiert Prüfserien des gleichen Materials. Das Probenalter innerhalb einer Prüfserie steigt von links nach rechts an.

Sowohl der relative Anstieg, als auch der absolute Anstieg der Durchlässigkeit ist materialspezifisch. So erfährt das Material HH einen Anstieg zwischen 0 und 1, das Material EE einen Anstieg von circa einer Zehnerpotenz, ebenso wie GH. Die Durchlässigkeit von FF steigt um 2 bis 2,5 Zehnerpotenzen an. Ähnliches gilt für den absoluten Anstieg der Durchlässigkeiten. Die Produkte EE und HH weisen einen absoluten Durchlässigkeitsanstieg im Bereich von  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  auf. Das Produkt GH weist einen um eine Zehnerpotenz größeren Anstieg auf, FF einen um zwei Zehnerpotenzen größeren Anstieg. Der absolute Anstieg je Produkt ist annähernd gleich. Somit lassen sich eindeutige Tendenzen bzgl. des FTW-Widerstandes der einzelnen Materialien ablesen.

Materialunabhängige Aussagen über das genaue Ausmaß des durch FTW induzierten Anstieges der Durchlässigkeit sind nicht möglich. Lediglich der qualitative Verlauf während einer FTW-Untersuchung kann verallgemeinert werden (vgl. Abbildung 43). Der FTW-Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit ist von Produkt zu Produkt unterschiedlich. Damit wird gezeigt, dass der materialspezifische Widerstand gegen FTW-Belastungen mit dem vorgestellten Prüfverfahren zuverlässig ermittelt werden kann.

## 7.4 Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden

Hinterfüllte EWS haben aufgrund ihres Aufbaus eine Systemdurchlässigkeit, die in vertikaler Richtung i.d.R. höher ist, als die reine Materialdurchlässigkeit der Hinterfüllung. Dies konnte in Kap. 5.5 qualitativ anhand der Tracerversuche nachgewiesen werden. Bei sieben der oben aufgeführten Prüfserien erfolgten korrespondierende Messungen der reinen Materialdurchlässigkeit. Dazu wurden zylindrische Prüfkörper unter den gleichen Anmachbedingungen hergestellt, ebenfalls für 28 Tage bei *in-situ*-Temperaturbedingungen gelagert und anschließend nach definierten Prüfzeiten die Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130-1 [1998] ermittelt. Die Prüfung erfolgte wiederum an drei Proben je Produkt. Eine Gegenüberstellung der Material- und der Systemdurchlässigkeiten ist in Abbildung 78 grafisch aufbereitet.

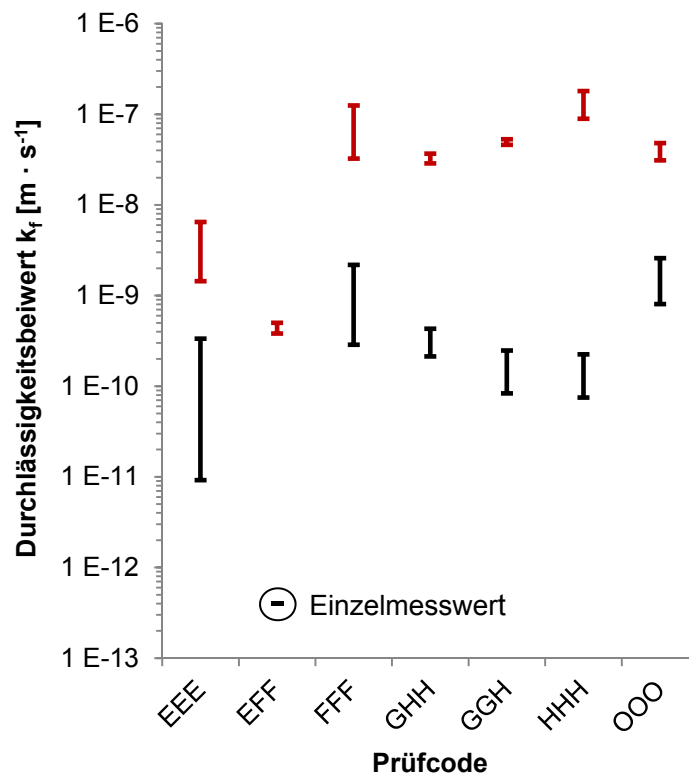


Abbildung 78: Systemdurchlässigkeitsbeiwerte der Prüfserien ohne FTW-Belastung (dunkelrot) und der korrespondierenden Materialdurchlässigkeiten (schwarz). Darstellung des Streuungsbereiches.

Die Materialdurchlässigkeiten der geprüften Materialien liegen bei den angewendeten Randbedingungen (mindestens 28 Tage Abbindezeit) im sehr schwach durchlässigen Bereich. Die Materialdurchlässigkeiten (Median) liegen unter  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Es ist ersichtlich, dass die Durchlässigkeiten der Materialproben erwartungsgemäß deutlich

geringer sind, als die Systemdurchlässigkeiten. Dies bestätigt die Aussagen, dass das Sondenrohr eine präferierte Wasserwegigkeit darstellt und somit eine erhöhte gerichtete Durchlässigkeit in einem Hinterfüllkörper vorhanden ist.

Aufgrund der Materialdurchlässigkeit sind keine Aussagen über den FTW-Widerstand des Systems möglich. So existieren Hinterfüllmaterialien die bei einer geringen Materialdurchlässigkeit auch nach FTW-Belastung eine geringe Durchlässigkeit im Prüfkörpersystem aufweisen. Ebenso kann die Systemdurchlässigkeit von Prüfkörpern aus sehr schwach durchlässigen Hinterfüllmaterialien (Materialdurchlässigkeit) nach FTW-Beanspruchung sehr hoch sein, d.h. bis in den durchlässigen Bereich reichen.

Der relative Anstieg der Materialdurchlässigkeit zur Systemdurchlässigkeit aufgrund des Sondenrohres liegt in einem Bereich zwischen minimal einer und maximal drei Zehnerpotenzen. Im Mittel liegt der Anstieg bei ca. zweieinhalb Zehnerpotenzen (Abbildung 79).

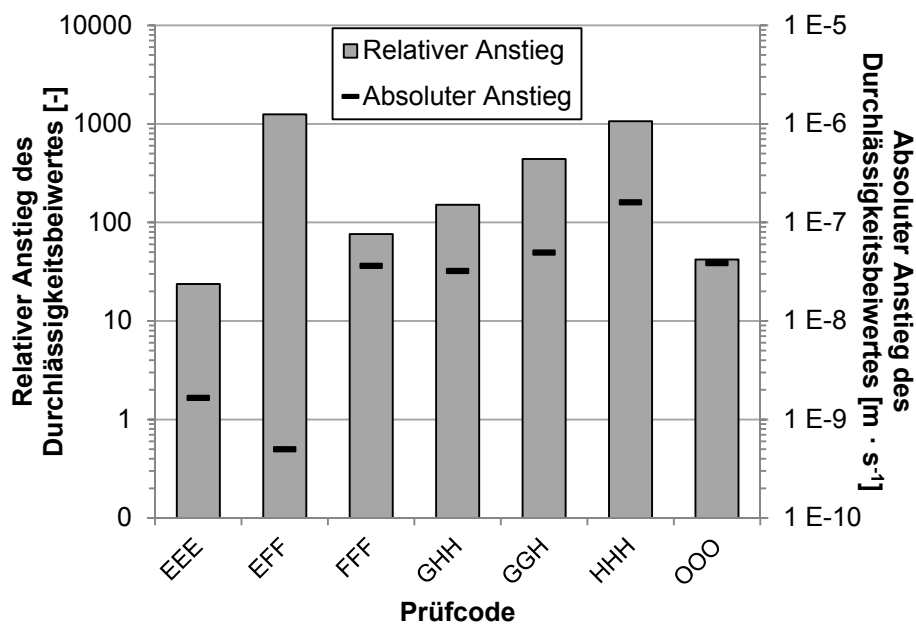


Abbildung 79: Anstieg der Durchlässigkeitsbeiwerte der Prüfserien im System gegenüber der reinen Materialdurchlässigkeit. Relativer Anstieg (grau) und absoluter Anstieg (schwarz).

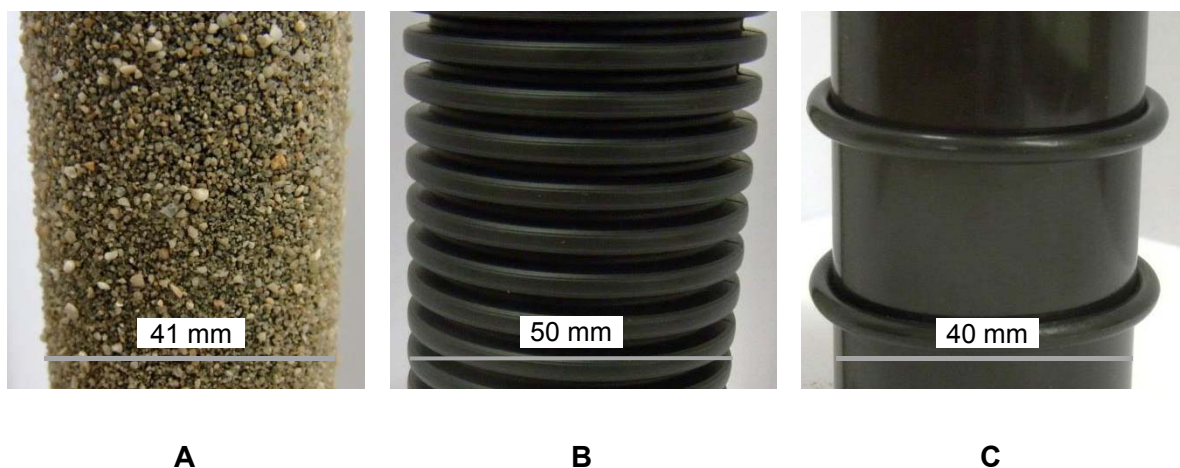
Es ist ersichtlich, dass das Sondenrohr einen großen Einfluss auf die Durchlässigkeit hat. Der Einfluss der Oberflächeneigenschaften des Sondenrohres auf die ermittelte Systemdurchlässigkeit wurde daher in einem ersten Versuchsprogramm untersucht. Dazu wurden Sondenrohre profiliert und mit der Hinterfüllung auf deren Systemdurchlässigkeit überprüft. Für diese Voruntersuchung wurden neben dem üblichen glatten Sondenrohr

noch drei Profilierungstypen getestet (Abbildung 80). Die Bezeichnung der drei modifizierten Oberflächen werde alphabetisch benannt.

**Profilierungstyp A** steht für besandete Rohre. Dazu wurde ein beidseitig haftendes Industrieklebeband auf HDPE-Rohre mit einem Außendurchmesser von 40 mm geklebt. Anschließend wurde das Rohr mit leichtem Druck in einem feinsandigen, gleichförmigen Sandbett gewälzt. Aufgrund des Klebstoffes haften die Sandkörner an dem Rohr und stellen somit reale Bedingungen einer Sandoberfläche dar. Dadurch werden auch die adhäsiven Eigenschaften des Sandgefüges berücksichtigt. Im Gegensatz dazu hat Gottschalk [2013] ein Sondenrohr vorgestellt, welches lediglich die Form einer besandeten Oberfläche aufweist, jedoch aus Kunststoff besteht. Dadurch ist eine grundsätzlich bessere Verzahnung möglich, jedoch kann aufgrund der hydrophoben Oberfläche keine adhäsive Verbindung hergestellt werden.

**Profilierungstyp B** besteht aus einem geriffelten Rohr, ebenfalls aus HDPE. Dieses ist ein Fertigprodukt und wird primär als Schutzrohr für erdverlegte Kabelleitungen verwendet. Das Rohr hat einen Innendurchmesser von 40 mm und einen Außendurchmesser von 50 mm. Somit konnte das Riffelrohr über das bei den Standardversuchen verwendete 40 mm-Rohr gezogen und die Enden verschweißt werden.

**Profilierungstyp C** besteht aus dem 40 mm-Rohr (HDPE) und passenden Dichtringen aus Acrylnitril-Butadien-Kautschuk einer Stärke von 3,5 mm. Diese wurden so stramm über das Rohr gezogen, dass eine Lageveränderung während des Vergießens nicht erfolgen konnte.



*Abbildung 80: Profilierungen des Sondenrohrs zur Bestimmung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit auf die hydraulische Systemdurchlässigkeit. Besandung (A), geriffeltes Rohr (B) und Dichtringe (C).*

Mit den beschriebenen Profilierungstypen wurden Prüfkörper eines Materials (Bezeichnung EE) unter den gleichen Bedingungen hergestellt und für 28 Tage bei Simulation der in-situ Temperatur verdunstungsgeschützt gelagert. Zum Prüfzeitpunkt wurden diese zugeschnitten, in die Messzellen überführt und die hydraulische Systemdurchlässigkeit bestimmt (Abbildung 81).

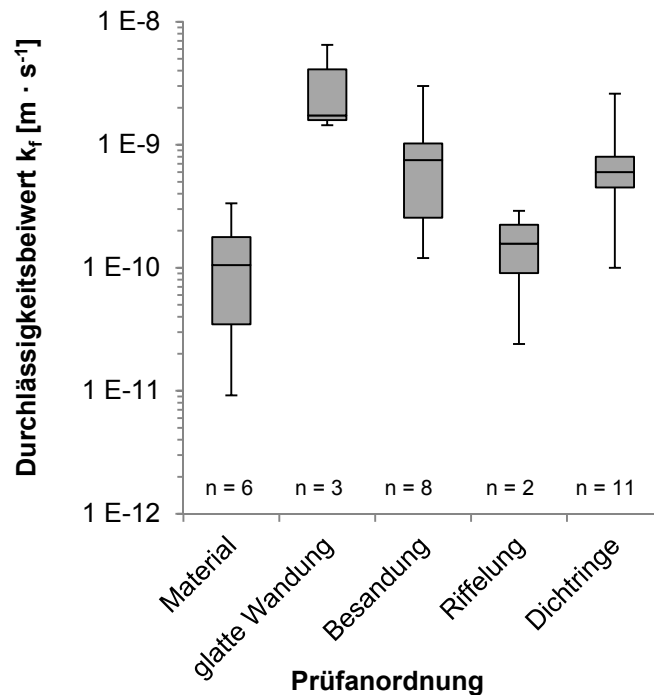


Abbildung 81: Gegenüberstellung der Material- und Systemdurchlässigkeit eines Hinterfüllbaustoffes mit unterschiedlich profilierten Sondenrohren.

Es ist zu erkennen, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte der Prüfkörper mit profilierten Rohren tendenziell auf einem niedrigeren Niveau liegen, als die Systemdurchlässigkeiten der glatten Wandung. Dies bestätigt erneut, dass die Kontaktfläche zwischen Hinterfüllmaterial und Sondenrohr die maßgebliche Wasserwegigkeit für die Systemdurchlässigkeit ist. Die ermittelten Materialdurchlässigkeiten sind geringer als die Systemdurchlässigkeiten.

Die Schwankungen in den ermittelten Durchlässigkeiten sind z.T. darin begründet, dass die Prüfkörper zwar vom selben Produkt (Hinterfüllmaterial) sind, das Material jedoch aus zwei Chargen entnommen wurde. Diese unterliegen selbstverständlich den üblichen Schwankungen, welche sich direkt auf die Messergebnisse auswirken. Grundsätzlich sind Größenordnungen ablesbar, die Aussagen über die Wirksamkeit der Profilierungen zulassen. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Probenanzahl bei

den geriffelten Profilierungen (B) gering ist. Trotzdem kann eine eindeutige Tendenz zu geringeren Systemdurchlässigkeiten abgelesen werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Profilierung der Sondenoberflächen grundsätzlich ein hohes Potenzial zur Verringerung der Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden besitzt. Jedoch muss das Hinterfüllmaterial in der Lage sein, trotz der Profilierungen den Bohrlochinnenraum bis an die Sonde heran lückenlos zu hinterfüllen. Daraus resultieren weitere Anforderungen an die Fließeigenschaften (und ggf. an das Quellvermögen) des Hinterfüllmaterials. Somit ist bei der Bewertung der hydraulischen Systemintegrität stets sowohl das Hinterfüllmaterial, als auch das Sondenmaterial zu berücksichtigen.

## 7.5 Korrelation der Verbundeigenschaften und der Systemdurchlässigkeiten

Die Verbundeigenschaften zwischen Hinterfüll- und Sondenmaterial haben, wie oben beschrieben, erheblichen Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit. Um diesen Einfluss näher zu bewerten, wurden Haftreibungsversuche an ausgewählten Hinterfüllbaustoffen durchgeführt. Diese orientierten sich an den Untersuchungen von Sugama [2006], der die Haftreibung von Zementsuspensionen an Metallrohren untersucht hat (Abbildung 82). Der hier verwendete Prüfkörperaufbau ist der gleiche, wie bei den zuvor beschriebenen Durchlässigkeitsversuchen (vgl. Kap. 4.3).



Abbildung 82: Haftreibungsuntersuchungen von Sugama [2006]. Prüfkörper aus Zementsuspension und Metallrohr (links) und Prüfaufbau für die Haftreibungsuntersuchungen (rechts).

Für die Untersuchungskampagne wurden jeweils drei Prüfkörper (vgl. Kap. 4.3) eines Produktes, wie nach Kap. 4.4 vorgegeben, hergestellt und 28 Tage unter in-situ Temperaturen gelagert. Es wurden Untersuchungen an fünf Produkten durchgeführt. Die Prüfkörper wurden in einem Betonprüfinstitut<sup>9</sup> auf ihre Haftreibung untersucht. Dafür wurde ein äquivalenter Anlagenaufbau zu dem von Sugama [2006] konzipiert, bei dem die aufzubringende Kraft zum axialen Herauslösen des mittigen HDPE-Rohres gemessen wird (Abbildung 82). Die gemessene Kraft wurde ins Verhältnis zur jeweiligen Mantelfläche gesetzt und so die Haftreibung des Hinterfüllbaustoffes an dem mittigen Sondenrohr bestimmt.

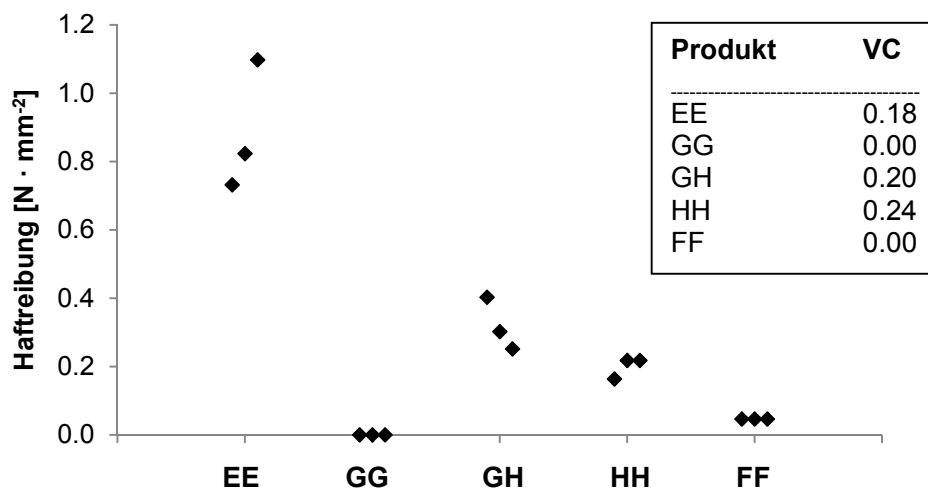


Abbildung 83: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Haftreibungsuntersuchungen an Prüfkörpern aus HDPE-Rohren und unterschiedlichen Hinterfüllbaustoffen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden anschließend mit den ermittelten Systemdurchlässigkeiten (Kap. 7.3 und 7.4) des jeweils gleichen Materials korreliert. Die Haftreibungen wurden der mittleren Systemdurchlässigkeit der korrespondierenden Prüfserie zugewiesen. Die Korrelation ist in Abbildung 84 dargestellt.

<sup>9</sup> QSI Institut für Qualitätssicherung, Stoffprüfung und Instandsetzungstechnik GmbH (2012/2013)



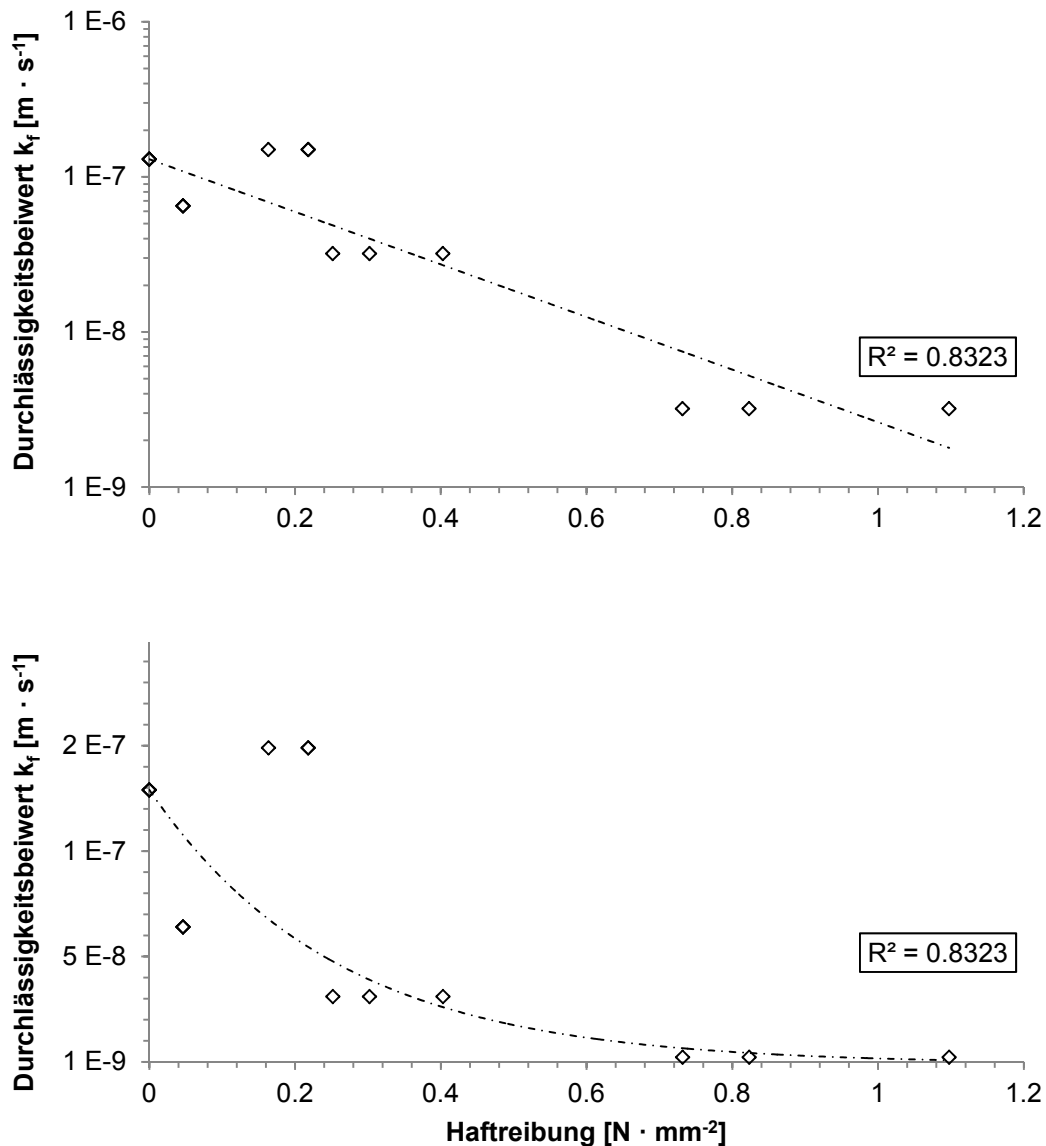


Abbildung 84: Korrelation der Ergebnisse der Haftreibungsuntersuchungen mit den gemessenen mittleren Systemdurchlässigkeiten der gleichen Materialien. Halblogarithmische Darstellung (oben) und lineare Darstellung (unten). Die gestrichelte Linie markiert die exponentielle Regressionskurve.

Es ist zu erkennen, dass Hinterfüllbaustoffe, die eine höhere Haftreibung in dem Versuchsaufbau erzielt haben, tendenziell auch geringere Systemdurchlässigkeiten aufweisen. Dies bestätigt die Annahme, dass die Kontaktfläche zwischen Hinterfüllbaustoff und Sondenmaterial eine präferierte Wasserwegigkeit darstellt. Weiterhin lässt sich daraus ableiten, dass volumenbeständige Hinterfüllbaustoffe mit einem geringen Schwindverhalten tendenziell geringere Systemdurchlässigkeiten (und höhere Haftreibungen) aufweisen. Die Ergebnisse werden durch die Aussage von Allan [2000] und Philippacopoulos & Berndt [2001] bestätigt, dass ein besserer Verbund

zwischen Sonde und Hinterfüllung zu geringeren Systemdurchlässigkeiten führt. Ähnliche Erkenntnisse haben Baumann et al. [2003] über die Druckfestigkeit des Materials und die Systemdurchlässigkeit publiziert.

„Ein Vergleich der Druckfestigkeiten [...] mit den Systemdurchlässigkeiten [...] zeigt, dass Abdichtmassen mit höheren Druckfestigkeiten niedrigere Systemdurchlässigkeiten ausweisen.“

[Baumann et al. 2003, S. 9]

Die Beobachtungen treffen jedoch vorerst nur für zementbasierte Hinterfüllungen zu. Reine Tonhinterfüllungen zeichnen sich weder durch eine hohe Haftreibung, noch durch eine hohe Materialdruckfestigkeit aus, jedoch weisen sie i.d.R. geringe Durchlässigkeiten bei Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen auf. Daher ist eine Pauschalisierung der Aussagen nicht für alle Hinterfüllmaterialien möglich, sondern muss auf zementbasierte Hinterfüllmaterialien eingeschränkt werden. Für halbfeste Hinterfüllungen ist eine derartige Korrelation nicht zielführend.

Für die zementbasierten Hinterfüllungen besteht in diesem Bereich großes Entwicklungspotenzial. Mit dem vorgestellten Prüfverfahren können Aussagen zur Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden getroffen werden, wie in Kap. 7.4 dargestellt. Für die reine Beurteilung der hydraulischen Integrität des Systems Hinterfüllung/Sonde könnten über den indirekten Parameter der Haftreibung Aussagen zur Systemdurchlässigkeit mit einem deutlich geringeren Aufwand getroffen werden. Dies gilt es durch weitere Messkampagnen zu untersuchen und zu quantifizieren.

## 8 DISKUSSION

### 8.1 Bewertung der Versuchsergebnisse

Im Rahmen der Untersuchungen an Hinterfüllmaterialien wurden je Produkt drei Prüfkörper gleichen Probenalters (Abbindezeit) untersucht. Dadurch ist es möglich direkt zu überprüfen, ob die Belastbarkeit der Ergebnisse gegen ist. Ein Vergleich der ermittelten Variationskoeffizienten ist in Abbildung 85 dargestellt.

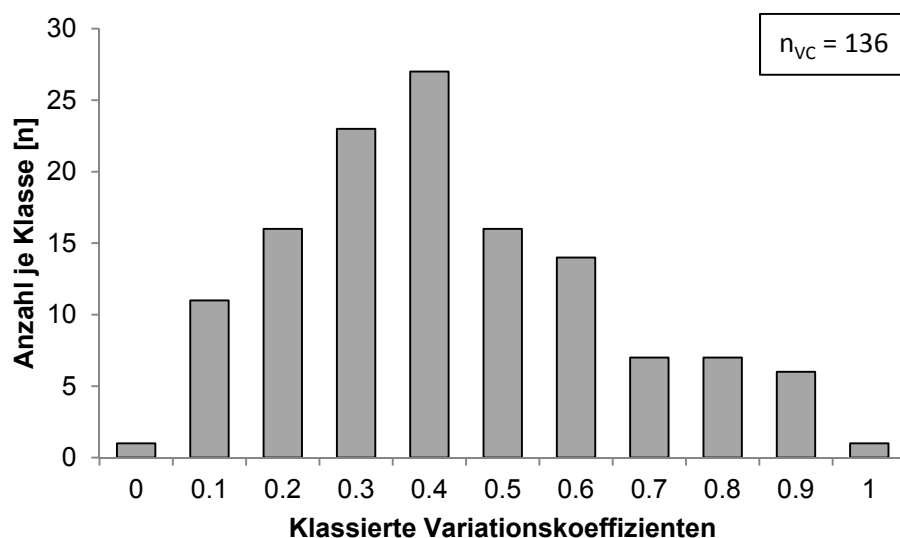


Abbildung 85: Klassierte Variationskoeffizienten der Versuche an Hinterfüllmaterialien.

Es ist ersichtlich, dass die Variationskoeffizienten um einen Wert von 0,4 schwanken. Dieser geringe Wert belegt die hohe Präzision des Messverfahrens. Die Streuung der Ergebnisse ist für die bei Durchlässigkeitsversuchen zu erwartenden Ungenauigkeit [ASTM D-5084 2010] als gering zu bewerten. Eventuelle Ausreißer können aufgrund der Dreifachversuche direkt erkannt werden, so dass diese bei der Auswertung gesondert behandelt werden. Gründe für Ausreißer sind z.B. Rissstrukturen in den Prüfkörpern, die bereits vor dem Einbau in die Messzellen vorhanden sind. Diese führen zu erhöhten Systemdurchlässigkeiten, die die Aussagen über das Hinterfüllmaterial unzulässig verzerren würden. Solche Risse können aus unterschiedlichen Gründen entstehen. In den wenigen vorliegenden Fällen ist davon auszugehen, dass die Risse aufgrund einer Leckage im Verdunstungsschutz hervorgerufen wurden. Es wurden des Weiteren auch Prototypen von Produkten geprüft, die sich noch im Entwicklungsstadium befanden. Ein unausgewogener Wasser-/Zement-Wert oder ein ungeeigneter Zementtyp können zu

hohen Schwinderscheinungen führen [Schäffel 2009], welche bei den Prüfkörpern zu lokaler Kapillarraumbildung oder gar zu Rissen führen. Diese können bei späterer Wassersättigung zum Ausgangspunkt der Frostschädigung werden [Czernin 1960]. Insgesamt ist die Anzahl der Fehlversuche gering und es können materialspezifische Aussagen bzgl. der ermittelten Systemdurchlässigkeiten und der FTW-bedingten Änderung der Systemdurchlässigkeit getroffen werden.

## 8.2 Bewertung der Frost-Tau-Wechsel-Versuche

Der Anstieg der Systemdurchlässigkeit aufgrund von FTW-Belastungen variiert materialabhängig. Es wurde festgestellt, dass die geprüften Hinterfüllbaustoffe ohne Zusätze quellfähiger Tonanteile (z.B. Bentonit) eine tendenziell hohe Systemdurchlässigkeit nach FTW-Belastung aufweisen. Dies ist auf das fehlende Nachquellpotenzial zurückzuführen. Die durch FTW induzierten Rissstrukturen werden nicht durch quellende Tonminerale geschlossen. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Rissstrukturen hydraulisch wirksam werden, ist deutlich höher, als bei Hinterfüllbaustoffen mit quellfähigen Tonanteilen. Das Material mit dem Prüfcode JKK ist ein Entwicklungsprodukt und hat laut Hersteller einen sehr hohen Zementwert. Durch den geringen Wasser-Feststoff-Wert des Produktes ist davon auszugehen, dass es zu lokalen Kapillarraumbildungen während des Abbindeprozesses gekommen ist, welche bei der anschließenden Frostbelastung einen idealen Ausgangspunkt für die Rissbildung darstellte [Czernin 1960].

Bis dato lagen kaum Informationen zum hydraulischen Verhalten von Hinterfüllbaustoffen nach FTW-Simulation unter *in-situ*-Bedingungen vor. In einer Studie des Zentrums für Angewandte Energieforschung Bayern e.V. (ZAE) wurde der Frosteinfluss auf vier Systemproben untersucht [Reuß & Kuckelkorn 2011]. Dazu wurden Doppel-U-Sonden in ein von innen besandetes Kunststoffrohr eingestellt und von unten nach oben verfüllt. Es kamen vier unterschiedliche Hinterfüllmaterialien zum Einsatz, welche unter Baustellenbedingungen angemacht wurden. Die Proben mit einer axialen Länge von rund 3,5 m wurden bei Raumtemperatur unter Wasserzufuhr mindestens 28 Tage gelagert. Anschließend wurden die axialen Systemdurchlässigkeiten ermittelt. Die Temperierung der Systemproben erfolgte mittels einer Wärmepumpe mit einer Fluidtemperatur von -6 °C. Die Durchfrostung und das Auftauen fand von innen nach außen gerichtet stufenweise statt. Nach jedem FTW wurde die Systemdurchlässigkeit erneut bestimmt [Kuckelkorn & Reuß 2012, 2013].

Die Systemdurchlässigkeiten nach 11 FTW-Simulationen lagen bei drei Proben in einem Bereich zwischen  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , welcher dem Durchlässigkeitsbereich der hier gemessenen Systemdurchlässigkeiten nach FTW-Belastung entspricht. Lediglich eine der Proben wies eine niedrigere Systemdurchlässigkeit unter  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  auf. Grundsätzlich wurde ebenfalls beobachtet, dass die ersten FTW den größten Einfluss auf die Durchlässigkeit haben.

Ein Abgleich mit den Ergebnissen der Studie des ZAE zeigt wiederum eine Übereinstimmung der Charakteristik. Die vier Systemproben des ZAE stiegen durch die FTW Simulation um den Faktor 6,6 (Mittelwert) an. Ein Vergleich der hier ermittelten relativen Anstiege der Systemdurchlässigkeiten zu den Literaturwerten von Kuckelkorn & Reuß [2013] ist in Abbildung 86 verdeutlicht. In der Grafik sind weiterhin die Anstiege der Materialien dargestellt, welche von der Freien und Hansestadt Hamburg für die Verwendung mit negativen Fluidtemperaturen zugelassen werden [BSU 2014c].

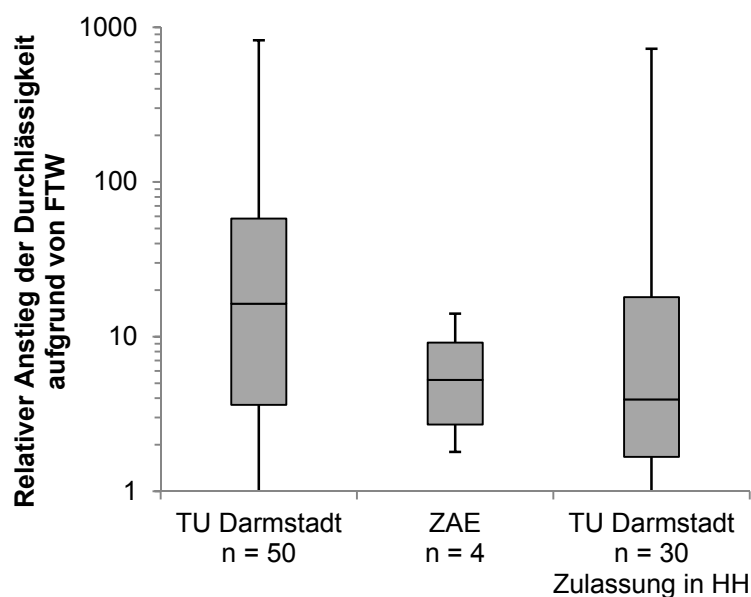


Abbildung 86: Vergleich des Anstieges der Systemdurchlässigkeiten aufgrund von FTW-Belastungen mit Untersuchungen des ZAE Bayern

Bei den 50 Proben der TU Darmstadt handelt es sich um die geprüften Materialien mit mindestens sechs FTW-Belastungen. Darunter sind auch Materialien, die als nicht widerstandsfähig gegenüber FTW-Belastungen einzuordnen sind. Somit sind die 30 Proben der in Hamburg zugelassenen Produkte eine Teilmenge der 50 Proben. Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse des ZAE den relativen Anstiegen der Durchlässigkeiten der Hinterfüllmaterialien entsprechen, welche in Hamburg für FTW zugelassen sind. Der Vergleich zeigt, dass die Ergebnisse der Studie des ZAE mit den vorliegenden

Laborversuchen korrespondieren. Mit der guten Übereinstimmung der beiden unabhängigen Studien kann davon ausgegangen werden, dass die beobachteten Materialcharakteristika in den Versuchen auf Technikum- und Realmaßstäbe übertragbar sind und die in-situ-Bedingungen repräsentieren.

Aufgrund des zeitabhängigen Materialverhaltens bei zementbasierten Hinterfüllbaustoffen ist die Einhaltung eines definierten Starttermins für die Vergleichbarkeit der Untersuchungen unabdingbar. In dieser Arbeit hat sich eine Abbindezeit von minimal 28 Tagen und maximal 56 Tagen bewährt. Proben mit einer kürzeren Abbindezeit weisen häufig eine erhöhte Durchlässigkeit und Frostepfindlichkeit auf [Anbergen et al. 2011a]. Bei älteren Proben ist zwar eine Verringerung der Frostepfindlichkeit festzustellen, jedoch ist aus Kapazitäts- und laborablauftechnischen Gründen eine frühere Prüfung zu empfehlen.

Der mit dem Probenalter zunehmende FTW-Widerstand (Abbildung 77) der zementbasierten Hinterfüllmaterialien bedeutet ein gutmütiges Materialverhalten für den Einsatz in EWS. Je länger das Material vor der ersten FTW-Beanspruchung (Austrocknungen ausgeschlossen) abbinden kann, desto geringer ist der relative Anstieg der Systemdurchlässigkeit. Daher ist aus Sicht des Grundwasserschutzes anzuraten, dafür Sorge zu tragen, dass die Hinterfüllung einer EWS nicht vor 28 Tagen (besser 56 Tagen) die ersten FTW-Ereignisse erfährt. Das bedeutet für die Praxis, dass EWS bevorzugt in Jahreszeiten mit geringem Heizbedarf in Betrieb genommen werden sollten, so dass genügend Zeit vor der Periode hohen Wärmeentzuges liegt. Ein direktes Überlasten der EWS wie etwa durch die Trocknung von Estrichböden, gilt es zwingend zu vermeiden.

### **8.3 Bewertung der ermittelten Systemdurchlässigkeiten**

Die Prüfkörper für die Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen wurden maßstabsgetreu zu regulären EWS (Doppel-U-Sonden) bemessen. Somit sind die an den Prüfkörpern ermittelten Systemdurchlässigkeiten grundsätzlich auf den Realmaßstab übertragbar. Über die Auswertung der durchgeführten Versuche und einem Abgleich mit Literaturwerten sind nicht nur Aussagen über die Systemdurchlässigkeiten der Prüfkörper, sondern auch über die Größenordnung der Systemdurchlässigkeiten in Betrieb befindlicher EWS möglich.

Eine Studie von Baumann et al. [2003] hat Systemdurchlässigkeiten von fünf Brunnenhinterfüllungen im Labor untersucht. Dabei wurden Mantelrohre mit einer

Bohrspülung gefüllt, ein PVC-Rohr eingestellt, welches den Brunnen simulieren sollte, und das Mantelrohr mit einer Hinterfüllsuspension verfüllt. Die axiale Prüflänge wurde mit 1,30 m angegeben. Nach einer Abbindezeit von 24 Stunden erfolgte die Ermittlung der hydraulischen Systemdurchlässigkeit. Diese lagen in einem Bereich zwischen  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und maximal  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Eine Studie des Austrian Research Centers GmbH [Niederbrucker & Steinbacher 2008] hat bei einer Studie bei fünf untersuchten Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden ebenfalls die Material- und Systemdurchlässigkeiten bestimmt. Die Materialbezeichnungen erfolgten anonymisiert. Die Materialdurchlässigkeiten wurden an zylindrischen Proben nach 28 Tagen Abbindezeit bei verdunstungsgeschützter Lagerung ermittelt. Abweichend zu der hier vorliegenden Untersuchung, wurden die Prüfkörper nicht bei *in-situ*-Temperatur, sondern bei Raumtemperatur gelagert. Die Ermittelten Durchlässigkeiten bewegten sich zwischen  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $6 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Somit liegen die ermittelten Materialdurchlässigkeiten der Hinterfüllbaustoffe in einem vergleichbaren Bereich wie bei der hier vorliegenden Untersuchung.

Mit drei Materialien wurden ebenfalls Systemdurchlässigkeitsversuche durchgeführt. Dazu wurde die Hinterfüllsuspension in ein Mantelrohr verfüllt. In dem Rohr war eine Doppel-U-Sonde eingebaut, die in einer Bentonitsuspension stand. Die Bentonitsuspension wurde durch die Hinterfüllsuspension verdrängt, welches die Verdrängung einer Bohrspülung simulieren sollte. Die Länge der Probe wurde mit 150 cm angegeben. Nach 24 Stunden Abbindezeit wurden die Systemdurchlässigkeiten der Prüfkörper bestimmt. Diese lagen zwischen minimal  $3 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und maximal  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Der Anstieg gegenüber der Materialdurchlässigkeit nach 24 Stunden lag bei circa eineinhalb Zehnerpotenzen.

Die Ergebnisse von Baumann et al. [2003], Niederbrucker & Steinbacher [2008] und Kuckelkorn & Reuß [2013] werden den Ergebnissen der hier durchgeführten Untersuchungen in Abbildung 87 vergleichend gegenübergestellt.

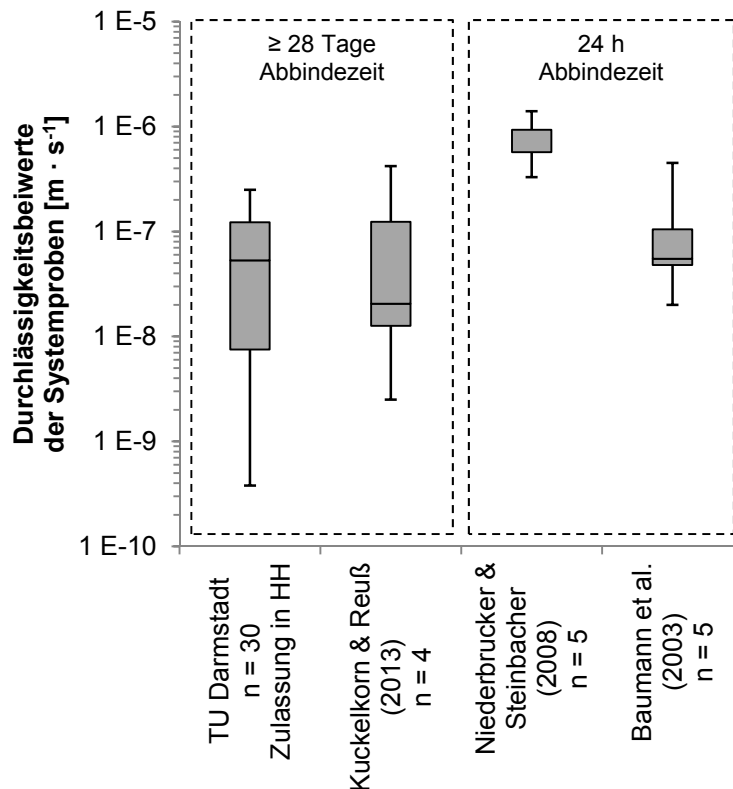


Abbildung 87: Gegenüberstellung von Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen mit Hinterfüllmaterialien für EWS und Brunnen.

Es ist ersichtlich, dass die ermittelten Systemdurchlässigkeiten mit mindestens 28 Tagen Abbindezeit in einem ähnlichen Bereich liegen. Die Systemproben mit lediglich 24 Stunden Abbindezeit liegen auf einem höheren Niveau. Dies ist bei den zementbasierten Hinterfüllungen in dem niedrigeren Hydratationsgrad begründet und plausibel. Die Untersuchungen an Hinterfüllungen für den Brunnenbau von Baumann et al. [2003] ergaben niedrigere Systemdurchlässigkeiten als die Untersuchungen an Hinterfüllmaterialien für EWS von Niederbrucker & Steinbacher [2008]. Das Gros der Durchlässigkeitswerte liegt im schwach durchlässigen Bereich und damit über den Durchlässigkeiten an Materialproben.

Die Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen von Allan & Philippacopoulos [1998b] ergaben Durchlässigkeiten in einem Bereich zwischen  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Damit stimmen sie mit den Ergebnissen dieser Arbeit sehr gut überein.

Die Untersuchungen vom ZAE [Kuckelkorn & Reuß 2012, 2013] weisen ein ähnliches Verhalten bezüglich des Anstieges der Systemdurchlässigkeit gegenüber der Materialdurchlässigkeit auf, wie in dieser Arbeit ermittelt (Abbildung 79). Die Durchlässigkeitsbeiwerte der vier Systemproben liegen ebenfalls um zwei



Zehnerpotenzen (Mittelwert Faktor 146) über der korrespondieren Materialdurchlässigkeit. Allerdings ist die statistische Signifikanz der Ergebnisse durch das sehr kleine Probenkollektiv von vier gering.

Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die hier durchgeführten Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen mit den maßstabsgetreu umgerechneten Prüfkörpern (Kap. 4.3) und den Lagerungsbedingungen (Kap. 4.4) die *in-situ*-Bedingungen reproduzieren und somit Aussagen über das hydraulische Durchlässigkeitsverhalten der Hinterfüllbaustoffe in EWS zulassen. Die Systemdurchlässigkeiten von EWS sind höher als die reinen Materialdurchlässigkeiten der Hinterfüllbaustoffe. Dieses gilt es bei der Bewertung der hydraulischen Integrität von EWS zu beachten.

## **8.4 Anwendung des Prüfverfahrens für die Praxis**

Aufgrund der geringen Abmessungen der Messzellen, die üblichen Triaxialzellen entsprechen, und der benötigten Infrastruktur (Druckluft, Wasseraufbereitung, Klimaschrank), kann das Prüfverfahren in nahezu jedes Erdbaulabor implementiert werden. Die für die Versuchsdurchführung benötigten Druckniveaus und der Flächenbedarf im Erdbaulabor erfordern keine besonderen Umbauten. Dies konnte durch die Implementierung des Prüfverfahrens in drei Erdbaulabore belegt werden. Somit ist das Prüfverfahren für eine standortunabhängige Einführung zur Qualitätssicherung geeignet.

Die Freie und Hansestadt Hamburg hat das beschriebene Prüfverfahren verbindlich für Hinterfüllmaterialien eingeführt [BSU 2014c], die für EWS-Anlagen unter Verwendung von Fluidtemperaturen unter 0°C eingesetzt werden sollen [Anbergen et al, 2013c]. Es werden regelmäßig aktualisierte Auflistungen der zugelassenen Produkte veröffentlicht. Somit wird sowohl den Investoren, als auch den Herstellern der Produkte Planungs- und Investitionssicherheit geboten. Mit dem hier vorgestellten Prüfverfahren steht erstmals in Deutschland eine behördlich anerkannte Messmethode zur Verfügung, welche die Systemdurchlässigkeit und die Durchfrostungsprozesse realitätsnah simuliert.

## **8.5 Qualitätssicherung auf der Baustelle**

Grundsätzlich ist das Prüfverfahren mit den Gießanlagen und den Messapparaturen dazu geeignet Prüfungen von Baustellenproben durchzuführen. Dabei gilt es jedoch diverse Aspekte bei der Probennahme und Lagerung zu beachten.

Als besondere Herausforderung könnte sich die Abstimmung mit der ausführenden Bohrfirma herausstellen. So muss das Personal für die Probennahme beim Hinterfüllen der EWS vor Ort sein. Dabei sollte die Person, welche die Probe entnimmt nicht von der Bohrfirma beauftragt oder gar Angestellter der Bohrfirma sein, um Interessenskonflikte zu vermeiden (Fremdüberwachung). Das heißt, dass eine reibungslose Abstimmung zwischen der Genehmigungsbehörde, der Bohrfirma und der Qualitätsüberwachung notwendig ist, um eine erfolgreiche Probennahme vor Ort durchzuführen.

Die Suspensionsproben sollen entweder direkt aus dem Mischer entnommen, oder müssen hilfsweise im Bohrloch beprobt werden. Neben den üblichen Baustellenversuchen, wie Suspensionsdichtenbestimmung, Bestimmung der Trichterauslaufzeit (TAZ) und der Messung des pH-Wertes, sollte die Temperatur der Umgebung und der Suspension aufgezeichnet werden. Die mit Suspension befüllte Gießanlage sollte zum einen unter in-situ-Temperaturbedingungen abbinden und zum anderen erschütterungsfrei gelagert werden, da andernfalls der Aushärtprozess des Materials unzulässig beeinflusst würde. Die weitere Probenlagerung und Prüfung erfolgt im Labor.

Hinsichtlich der praktischen Ausführung von Probennahme, -herstellung, -lagerung und –transport sowie den Begleitmessungen, ist ein praxisnahes Handbuch auszuarbeiten.

## 9 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Einfluss von Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen auf die hydraulische Integrität von Hinterfüllmaterialien ist messtechnisch mittels des vorgestellten modifizierten Durchlässigkeitsversuches erfassbar. Die Beachtung der in-situ auftretenden Kontaktflächen zwischen Hinterfüllung und Sondenmaterial kann labortechnisch simuliert werden und führt zu realitätsnahen Ergebnissen. Über die Bewertung der Systemdurchlässigkeit und den Anstieg der Systemdurchlässigkeit aufgrund von zyklischen Frost-Tau-Simulationen können Aussagen zum charakteristischen Verhalten unterschiedlicher Hinterfüllmaterialien getroffen werden.

Die in dieser Arbeit untersuchten Hinterfüllmaterialien (zementbasierte Fertigmischungen) wiesen eine Materialdurchlässigkeit auf (Durchlässigkeitsbeiwert an zylindrischen Proben gemäß DIN 18130-1 [1998]), welche den hier diskutierten nationalen und internationalen Vorgaben an Hinterfüllbaustoffe für EWS entsprechen (Median des Durchlässigkeitsbeiwertes kleiner gleich  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Die Systemdurchlässigkeiten der untersuchten Prüfkörper wiesen gegenüber den reinen Materialproben eine deutlich erhöhte Durchlässigkeit auf. Ursache ist die Kontaktfläche zwischen der Hinterfüllung und dem Sondenrohr begründet. Der Unterschied zwischen Systemdurchlässigkeit und Materialdurchlässigkeit beläuft sich bei dem hier eingesetzten Sondentyp auf ca. zwei Zehnerpotenzen. Den Ergebnissen nach, ist mit einer höheren vertikalen Durchlässigkeit hinterfüllter Erdwärmesonden zu rechnen, als der Durchlässigkeitsbeiwert (Materialdurchlässigkeit) des Hinterfüllbaustoffes. Die muss bei der Planung und Genehmigung von EWS-Anlagen berücksichtigt werden.

Zyklische Frost-Tau-Belastungen führen in der Regel zu einer Erhöhung der Systemdurchlässigkeit. Die Durchfrostung von innen nach außen (wie in-situ) führt zu fundamental anderen Schadensbildern als die bisher angewendeten Prüfmethoden mit Durchfrostungen von außen nach innen. Die Eisbildungsmechanismen in Hinterfüllmaterialien ähneln den Theorien der Durchfrostungsprozesse in feinkörnigen Böden, wie sie von Konrad & Morgenstern [1980] beschrieben worden sind.

Bereits die ersten FTW-Ereignisse, die auf eine Hinterfüllung einwirken, zeigen den maßgeblichen Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit. Dieser Einfluss nimmt mit steigender Anzahl an FTW ab, so dass mit nur wenigen (meist bis zu sechs) FTW-Simulationen fundierte Aussagen über den FTW-Widerstand des Hinterfüllmaterials

getroffen werden können. Daher ist davon auszugehen, dass die Hinterfüllung einer EWS, welche mit einem FTW-widerstandsfähigen Hinterfüllmaterial errichtet wurde, durch FTW über viele Betriebsjahre keinen weiteren hydraulischen Durchlässigkeitsanstieg verzeichnet, als den durch die ersten FTW entstandenen. Weiterhin nimmt der relative Anstieg der Systemdurchlässigkeit aufgrund von FTW-Belastungen mit zunehmenden Probenalter vor dem ersten FTW ab.

Der FTW-Widerstand von Hinterfüllmaterialien ist materialabhängig. Der FTW-Einfluss auf die in dieser Arbeit geprüften Fertigprodukte ist sehr unterschiedlich. So existieren Systeme aus Sonden und Hinterfüllmaterial, deren hydraulische Systemdurchlässigkeit aufgrund von FTW-Belastungen nur geringfügig ansteigt. Gleichwohl sind Systeme mit Hinterfüllmaterialien geprüft worden, deren Durchlässigkeit in einem Bereich von drei Zehnerpotenzen angestiegen ist. Das charakteristische Materialverhalten konnte reproduzierbar quantifiziert werden und es sind eindeutige Aussagen zum FTW-Widerstand möglich. Weiterhin ist eine abnehmende Frostempfindlichkeit der geprüften Hinterfüllmaterialien mit zunehmendem Prüfkörperalter festzustellen. Je später das erste Frost-Tau-Ereignis in einer hinterfüllten EWS eintritt, desto gutmütiger ist das Materialverhalten der Hinterfüllung unter Gesichtspunkten der hydraulischen Integrität. Folglich ist der Zeitpunkt des ersten Frost-Tau-Ereignisses einer EWS ausschlaggebend für den Durchlässigkeitsanstieg.

Das entwickelte Plug-In befähigt das numerische Simulationsprogramm FEFLOW den FTW-Einfluss auf die Temperatúrausbreitung in porösen Medien zu simulieren. Mit FEFLOW können thermisch-hydraulisch gekoppelte Transportprozesse in Böden abgebildet werden. Die Software wird häufig für die Simulation von größeren geothermischen Anlagen verwendet. Über einen implementierten C++ Code werden die für die Temperatúrausbreitung maßgeblichen Materialeigenschaften derartig modifiziert, dass ein Einfrieren und Auftauen des Porenwassers und die daraus resultierenden thermischen Auswirkungen nachgebildet werden können. Dies wurde über analytische, numerische und experimentelle Lösungen bestätigt. Mit den getroffenen Annahmen und Modifikationen sind mit FEFLOW zuverlässige Vorhersagen der Temperaturverteilung und FTW-Einfluss möglich.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prüfverfahren liefert realitätsnahe und reproduzierbare Ergebnisse. Die Ermittlung der Systemdurchlässigkeit vor und nach FTW-Simulationen hat sich als praktikables Maß für die Bewertung des FTW-Einflusses bewährt. Die Systemdurchlässigkeiten der in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörper entsprechen den Systemdurchlässigkeiten vergleichbarer Untersuchungen im Labor- und

Technikummaßstab. Durch die Temperierung über das mittige Rohr der Prüfkörper, wird der in-situ Durchfrostungsprozess nachgebildet und über einen variablen Radialdruck können unterschiedliche Erddrücke simuliert werden. Neben der Prüfung von zementbasierten Hinterfüllmaterialien, ist auch die Prüfung von Pelletbaustoffen, Böden und jeglichen schütt- oder fließfähigen Baustoffen möglich. Aufgrund der Abmessungen der entwickelten Messzelle (in etwa die einer regulären Triaxialzelle nach DIN 18130-1 [1998]) ist das Prüfverfahren flexibel aufstellbar und kann in nahezu jedes Erdbaulaboratorium integriert werden, welches die Rahmenbedingungen für die Versuchsklasse 1 nach DIN 18130-1 [1998] erfüllt.

Über Kalibrierungsversuche an drei Standorten mit drei unterschiedlichen Laborinfrastrukturen konnte die Standortunabhängigkeit des Prüfverfahrens überprüft und bestätigt werden. Die Freie und Hansestadt Hamburg hat das Prüfverfahren verbindlich als Prüfverfahren für frostbeständige Hinterfüllmaterialien für EWS eingeführt [BSU 2014b]. Somit ist das Prüfverfahren deutschlandweit das erste behördlich anerkannte FTW-Prüfverfahren für Hinterfüllmaterialien für EWS und definiert neben dem Stand der Wissenschaft auch den Stand der Technik.

Durch die Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass große Qualitätsunterschiede der Hinterfüllmaterialien hinsichtlich des FTW-Widerstandes existieren. Mit dem Prüfverfahren kann anhand von einheitlichen Rahmenbedingungen der Prüfung die Eignung solcher Materialien überprüft werden. Den Forderungen der Regelwerke und der Länder nach frostsicheren Hinterfüllmaterialien liegt somit ein unabhängiges Bewertungsverfahren vor. Die Festlegung von Grenzwerten obliegt dabei den zuständigen Genehmigungsinstanzen. Durch die Einbindung des Prüfverfahrens in der Produktentwicklung ist eine zielgerichtete Entwicklung geeigneter Baustoffe möglich und es ist mit einem Qualitätsanstieg des FTW-Widerstandes zu rechnen.

Durch FTW-widerstandsfähige Hinterfüllmaterialien können die Grundanforderungen an die Hinterfüllung (thermische Anbindung und hydraulische Integrität) auch bei negativen Wärmeträgerfluidtemperaturen grundsätzlich eingehalten werden.



## 10 AUSBLICK

Die Systemdurchlässigkeit von EWS wurde bisher nur in Labor- und Technikummaßstäben untersucht. Dabei stand bisher stets die Hinterfüllung im Fokus der Untersuchung. Die Oberflächenbeschaffenheit der Sondenrohre wurde nur am Rande beleuchtet. Für die Entwicklung verbesserter Materialien unter Gesichtspunkten der Systemdurchlässigkeiten gilt es jedoch beide Komponenten zu untersuchen. Die Vorversuche zu Profilierungen der Sondenrohre und die Untersuchungen von Gottschalk [2013] geben Anlass, der Oberflächenbehandlung von EWS-Sonden ein großes Potenzial in Hinblick auf eine Verringerung der Systemdurchlässigkeit zuzuschreiben. Hier besteht erhebliches Forschungs- und Entwicklungspotenzial.

Es konnte gezeigt werden, dass nicht die Druckfestigkeit oder der Massenverlust nach den einschlägigen Prüfnormen die entscheidenden Kriterien für die hydraulische Integrität von Hinterfüllbaustoffen sind, sondern die Systemdurchlässigkeit. Daher ist davon auszugehen, dass bei der Entwicklung von neuen Hinterfüllbaustoffen Materialien mit quellfähigen Tonanteilen mehr in den Fokus geraten. Diese haben tendenziell eine bessere Anbindung an die Sondenrohre und ein erhöhtes Selbstheilungspotenzial. In Kombination mit optimierten Sondenrohren ist davon auszugehen, dass die Systemdurchlässigkeit von EWS erheblich reduziert werden kann.

Das Prüfverfahren und die Gießanlagen für die Probenherstellung sind grundsätzlich für eine Probennahme auf der Baustelle und der Prüfung im Labor geeignet. Die Konzeption und eine Handlungsanweisung für derartige Probennahmen gilt es zu entwickeln und in Pilotvorhaben zu erproben. Ein Abgleich der Ergebnisse von im Labor und auf der Baustelle hergestellten Probekörpern würde Aufschluss über die Qualität der tatsächlich angemachten Suspension auf der Baustelle geben. Derartige Baustellenkontrollen und Probenahmekonzepte könnten als Qualitätssicherungsmaßnahmen etabliert werden.

Das entwickelte Prüfverfahren ist in der Lage, neben den Messungen der Systemdurchlässigkeiten und derer Veränderung aufgrund von Frost-Tau-Wechselsimulationen, auch andere thermische Lastzyklen auszuführen, wie etwa für die Einspeicherung von hohen Temperaturen in den Untergrund. Daher eignet sich das Prüfverfahren grundsätzlich für die Überprüfung der Temperaturbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für thermische Erdspeicher. Neben den Hinterfüllbaustoffen für EWS, können auch weitere Baustoffe mit dem Verfahren geprüft werden, bei denen die

Wärmeübergänge oder hydraulische Eigenschaften im Fokus stehen. Dazu gehören z.B. Bettungsmaterialien für den Kabeltrassenbau erdverlegter Stromkabel. Die thermische Belastbarkeit der verbauten Komponenten der Messzellen muss dabei miteinbezogen und ggf. angepasst werden.

Eine Hauptaufgabe der Hinterfüllung ist die thermische Anbindung der Sonde, um einen möglichst hohen Wärmestrom zu ermöglichen. Ablöseeffekte der Hinterfüllung von der Sonde oder Risse im Hinterfüllkörper können den Wärmeübergang erheblich verringern. Aufgrund der Konstruktion der Messzelle kann durch geringfügige Modifikationen die Systemwärmeleitfähigkeit von Prüfkörpern aus Hinterfüllmaterialien gemessen werden. Bisherige experimentelle Untersuchungen haben bei diesen Fragestellungen die maßgeblichen in-situ-Randbedingungen unzureichend beachtet, wie auch bei der Prüfung der hydraulischen Integrität. Die Messung einer Systemwärmeleitfähigkeit könnte grundlegende Erkenntnisse über die Langzeiteffizienz EWS (-Speicher) unter FTW-Beanspruchung ergeben.

Durch das entwickelte Plug-In können FTW-Vorgänge mit FEFLOW simuliert werden. Dies ist nicht nur bei geothermischen Fragestellungen von Interesse, sondern besonders in Permafrostbereichen und anderen geotechnischen Applikationen wie z.B. Hangstabilitäten. Das Plug-In ist in der Lage thermisch-hydraulische Prozesse abzubilden. Durch eine mechanische Kopplung wären weitere Anwendungen, wie im Tunnelbau zur Berechnungen von Eisschilden, möglich. Darüber hinaus könnte das Plug-In mit regionalen Grundwassermodellen kombiniert werden, um so die Infiltrationsraten und Oberflächenabflüsse genauer bestimmen zu können. Da das Plug-In zwar FEFLOW-spezifisch geschrieben wurde, aber auf C++ basiert, kann das Plug-In ohne großen Aufwand in andere FEM Software eingebunden und weitere Benchmarks durchgeführt werden.



## LITERATURVERZEICHNIS

- Abichou, T., Benson, C.H. & Edil, T.B. (2004), „Network model for hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures“, *Canadian Geotechnical Journal*, **41**, 698-712
- Adam, T. (2006), „Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
- Albrecht, I. & Frank, J. (2010), „Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost/Tau-Wechseln“, *bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, **05/2010**, 28-33
- Aldrich, H.P. & Paynter, H.M. (1953), „Analytical Studies of Freezing and Thawing of Soils“, Frost Investigations, First Interim Report, Technical Report No. 42, ARMY-NED Boston, MA, USA
- Alexiades, V. & Solomon, A.D. (1993), „Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes“, Hemisphere Publishing Corporation, Washington
- Allan, M.L. (2000), „Materials characterization of superplasticized cement-sand grout“, *Cement and Concrete Research*, **30**, 937-942
- Allan, M.L. & Philippacopoulos, A.J. (1998a), „Thermal Conductive Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps: Progress Report FY 98“, BNL-66103, Informal Report, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA
- Allan, M.L. & Philippacopoulos, A.J. (1998b), „Ground Water Protection Issues with Geothermal Heat Pumps“, Bericht, BNL-66666, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA
- Allan, M.L. & Philippacopoulos, A.J. (2000), „Performance Characteristics and Modelling of Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps“, Proceedings World Geothermal Congress 2000, 28.05.-10.06.2000, Kyushu, Japan
- Ammon, H. (2011), „Temperieren mit Flüssigkeiten – Thermostate für Laboranwendungen“, Band 239, Verlag Moderne Industrie, Landsberg am Lech
- Anbergen, H., Frank, J., Albrecht, I. & Dittrich, H. (2011a), „Prüfzelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterial für EWS“, *bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, **10/2011**, 38-43
- Anbergen, H., Frank, J. & Sass, I. (2011b), „Entwicklung und Inbetriebnahme eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf das Verpressmaterial von Erdwärmesonden“, Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V. (Hg.): Tagungsband Der Geothermiekongress 2011, 15.-16.11.2011, Bochum
- Anbergen, H., Frank, J. & Sass, I. (2012), „Quality assurance of grouting for Borehole Heat Exchangers“, Proceedings 12th International Conference on Energy Storage - InnoStock 2012, 16.-18.05.2012, Lleida, Spanien
- Anbergen, H. & Sass, I. (2013a), „Freeze-Thaw-Behaviour: Observations in Grouted Borehole Heat Exchangers“, *Proceedings Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA
- Anbergen, H., Lehr, C., Frank, J., Müller, L. & Sass, I. (2013b), „Verpressungen in der oberflächennahen Geothermie – Qualitätssicherung im Feld und im Labor“, Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V. (Hg.): Tagungsband Der Geothermiekongress 2013, 12.-14.11.2013, Essen
- Anbergen, H., Frank, J., Müller, L. & Sass, I. (2013c), „Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für den Nachweis der Frost-Tau-Wechselwiderstandsfähigkeit von Verpressmaterial“, Konferenzbeitrag – Bundesverband Wärmepumpe e.V. (BWP) – Praxisforum 2013, Offenburg
- Anbergen, H., Frank, J., Müller, L. & Sass, I. (2014a), „Freeze-Thaw-Cycles on Borehole Heat Exchanger Grouts: Impact on the Hydraulic Properties“, *Geotechnical Testing Journal*, **37**, 639-651

- Anbergen, H., Rühaak, W., Frank, J. & Sass, I. (2014b), „ Numerical Simulation of a Freeze-Thaw-Testing Procedure for Borehole Heat Exchanger Grouts with FEFLOW“, *Canadian Geotechnical Journal*, (in review)
- Arianta, A. (2012), „Versuche zur Bestimmung des Temperatureinflusses auf den Abbindeprozess von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden“, unveröffentl. Masterarbeit, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Höxter
- Asadineczad, A., Lehocký, M., Sáha, P. & Mozetič, M. (2012), „Recent Progress in Surface Modification of Polyvinyl Chloride“, *Materials*, **5**, 2937-2959
- Baier, C. (2008), „Thermisch-hydraulische Simulationen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau unter Einfluss einer Grundwasserströmung“, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen
- Baumann, K., Niehues, B., Tholen, M. & Treskatis, C. (2003), „Untersuchungen zur Bestimmung von Qualitätskriterien für Abdichtungsmaterialien im Brunnenbau“, Abschlussbericht, Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V - DVGW, Bonn
- Bassetti, S., Rohner, E., Signorelli, S. & Matthey, B. (2006), „Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden – Schlussbericht“, 99995 – Geothermie, Report, Swiss Federal Office of Energy, Schweiz
- Becher, H.H. (2008), „Wasserbindung und Porengrößenverteilung“, In: Blume, H.-P., Felix-Henningsen, P., Fischer, W.R., Frede, H.G., Horn, R. & Stahr, K.: Handbuch der Bodenkunde, 29. Erg. Lfg. 03/08, Wiley-VCH
- Bense, V.F., Ferguson, G. & Kooi, H. (2009), „Evolution of shallow flow systems in areas of degrading permafrost“, *Geophysical Research Letters*, **36**, L22401, 1-6
- Bense, V.F., Kooi, H., Ferguson, G. & Reas, T. (2012), „Permafrost degradation as a control on hydrogeological regime shifts in a warming climate“, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **117**, F03036
- Benson, C.H., Abichou, T., Olson, M. & Bosscher, P. (1995a), Winter Effects on the Hydraulic Conductivity of Compacted Clay“, *Journal of Geotechnical Engineering*, **121**, 69-79
- Benson, C.H., Chamberlain, E.J., Erickson, A.E. & Wang., X. (1995b), „Assessing Frost Damage in Compacted Clay Liners“, *Geotechnical Testing Journal*, **18**, 234-333
- Bentz, D.P., Snyder, K.A. & Stutzman, P.E. (1997), „Hydration of Portland Cement: The Effects of Curing Conditions“, 10th International Congress on the Chemistry of Cement. Proceedings. Volume 2, Schweden
- Berndt, M.L. & Philippacopoulos, A.J. (2008), „Improving the Performance of Geothermal Heat Pumps through Borehole Grout Materials“, Australian Geothermal Energy Conference, Canberra 19.-22.08.2008, Australien
- Bleymüller, J. (2012), „Statistik für Wirtschaftswissenschaftler“, 16. Aufl., Verlag Franz Vahlen, München
- Bohne, K. (1998), „Wasserbewegung und Wasserleitfähigkeit des Bodens“, In: Blume, H.-P., Felix-Henningsen, P., Fischer, W.R., Frede, H.G., Horn, R. & Stahr, K.: Handbuch der Bodenkunde, 4. Erg. Lfg. 05/98, Wiley-VCH
- Bonacina, C., Comini, G., Fasano, A. & Primicerio, M. (1973), „Numerical Solution of Phase-Change Problems“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **16**, 1825-1832
- Bronfenbrener, L. & Bronfenbrener, R. (2010), „Modeling frost heave in freezing soils“, *Cold Regions Science and Technology*, **61**, 43-64
- Burbaum, U. (2013), „Hohlraumbau“, Vorlesungsskript WS 2013/2014, TU Darmstadt
- Carlsaw, H.S. & Jaeger, J.C. (1959), „Conduction of Heat in Solids“, Second Edition, Oxford University Press, Great Britain
- Chamberlain, E.J. (1981), „Frost susceptibility of soil – Review of index tests“, CRREL Monograph 81-2, Hanover, New Hampshire, USA

- Chamberlain, E.J., Erickson, A.E. & Benson, C.H. (1997), „Frost Resistance of Cover and Liner Materials for Landfills and Hazardous Waste Sites“, CRREL Special Report 97-29, New Hampshire, USA
- COMSOL (2012), „Phase Change“, White Paper, COMSOL Multiphysics 4.3a
- Coussy, O. (2005), „Poromechanics of freezing materials“, *Journal of the Mechanics and Physics of Soils*, **53**, 1689-1718
- Czernin, W. (1960), „Zementchemie für Bauingenieure“, Bauverlag, Wiesbaden
- Darcy, H. P. (1856), „Les fontaines publiques de la ville de Dijon“, Dalmont, Paris
- Diersch, H.-J. G. (2014), „FEFLOW – Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Springer, Berlin
- Dittrich, H. (2013), „Prüfverfahren zur Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Verpressmaterialien für EWS in Hamburg“, 6. Norddeutsche Geothermietagung, Hannover 23.-24.10.2013
- Dittrich, H., Rumohr, S. & Schäfer, I. (2014), „Prüfverfahren zur Frost-Tau-Wechsel-Widerstandsfähigkeit von Verpressmaterialien – Möglichkeiten und Grenzen“, Vortrag, OTTI – Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 01.07-02.07., Neumarkt
- Ebert, H.-P., Büttner, D., Drach, V., Hemberger, F., Oberdorf, Ch., Fricke, J., Barthel, R., Udluft, P., Marquardt, G., Wilke, H., Steinheimer, A., Pfeiffer, J., Skorka, T. & Reuß, M. (2000), „Optimierung von Erdwärmesonden“, Report ZAE 2-1000-1 (2000), Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Garching
- Frank, J. (1983), „Vergleichende ingenieurgeologische Untersuchungen an smectit- und palygorskitreichen Tonen des Alttertiärs im Iullemden Basin, NW-Nigeria“, Dissertation, Universität Hamburg, Hamburg
- Frank, J. & Albrecht, I. (2010), „Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost-Tauwechsel“, Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V. (Hg.): Tagungsband Der Geothermiekongress 2010, 17.-19.11.2010, Karlsruhe
- Ganz, B., Schellschmidt, R., Schulz, R. & Sanner, B. (2013), „Geothermal Energy Use in Germany“, Tagungsband, European Geothermal Congress 2013, 03.-07.07.2013, Pisa, Italien
- Gottschalk, D. (2013), „Hydraulische Systemdichtheit“, Vortrag: GeoTherm Offenburg, 28.02./01.03.2013
- Gudehus, G. (1996), „Erddruckermittlung“, In: Smoltczyk, H.-U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch Teil 1, 5. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- Hager, M. (1996) „Eisdruck“, In: Smoltczyk, H.-U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch Teil 1, 5. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- Hellström, G., Sanner, B., Klugescheid, M., Gonka, T. & Mårtensson, S. (1997), „Experiences with the Borehole Heat Exchanger Software EED“, Proceedings 7th International Conference on Energy Storage - MegaStock 1997, 18.-21.06.1997, Sapporo, Japan
- Hermann, V.J. (2007) „Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden“, Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe
- Hermann, V.J. & Czurda, C (2007), „Reliable and Durable Grouting of Borehole Heat Exchangers“ Konferenzbeitrag European Geothermal Congress 2007, 30.05.-01.06, Unterhaching
- Hillerns, F. (1999), „Thermophysikalische Eigenschaften und Korrosionsverhalten von Kälteträgern“, DIE KÄLTE & Klimatechnik, **10/1999**, 110-114
- Hu, H. & Argyropoulos, S.A. (1996), „Mathematical modelling of solidification and melting: a review“, *Modelling and Simulation in Material Science and Engineering*, **4**, 371-396
- Ingersoll, L.R. & Plass, H.J. (1948), „Theory of ground pipe heat source for the heat pump“, *ASHVE Trans*, **47**, 339-348

- ISE (2011), „Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb“, Bericht zum Förderkennzeichen 0327401A, Fraunhofer – Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg
- Jessberger, H.L. & Jagow-Klaff, R. (1996), „Frost im Baugrund“, In: Smolczyk, H.-U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch Teil 1, 5. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- Johansson, T. (2009), „Artificial Ground Freezing in Clayey Soils – Laboratory and Field Studies of Deformations During Thawing at the Bothnia Line“, Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden
- Johansen, O. (1977), „Thermal Conductivity of Soils“, Draft Translation 637, CRREL, S. 322, Hanover, NH, USA
- Kézdi, Á. (1976), „Fragen der Bodenphysik“, VDI Verlag, Düsseldorf
- Kjellsen, K.O., Detwiler, R.J. & GjØrv, O.E. (1991), „Development of Microstructures in Plain Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures“, *Cement and Concrete Research*, **21**, 179-189
- Kölbel, T. (2010), „Grundwassereinfluss auf Erdwärmesonden: Geländeuntersuchungen und Modellrechnungen“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- Konrad, J.-M. & Lemieux, N. (2005), „Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material“, *Canadian Geotechnical Journal*, **42**, 515-527
- Konrad, J.-M. & Morgenstern, N.R. (1980), „A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils“, *Canadian Geotechnical Journal*, **17**, 473-486
- Kraus, J.F., Benson, C.H., Erickson, A.E. & Chamberlein, E.J. (1997), „Freeze-Thaw Cycling and Hydraulic Conductivity of Benotitic Barriers“, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123**, 229-238
- Kuckelkorn, J.M. & Reuß, M. (2013), „Hydraulische Systemdichtheit und Frostbeständigkeit von Erdwärmesonden“, *bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, Sonderheft Geothermie 2013, 6-13
- Kuckelkorn, J.M. & Reuß, M. (2012), „Methodik und Ergebnisse zur hydraulischen Durchlässigkeit von Verfüllbaustoffen bei Erdwärmesonden – Bestimmung des kf-Wertes und Alterung von Erdwärmesonden-Systemen in einem Großversuchsstand“, Tagungsband, 3. VDI-Fachkonferenz Wärmepumpen 2012, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf
- Kübert, M., Walker-Hertkorn, S. & Kuntz, D. (2014), „Die Temperaturentwicklung im Ringraum einer Erdwärmesonde“, *GeoTherm Offenburg*, 20.-21.02.2014, Offenburg
- Langguth, H.-R. & Voigt, R. (2004), „Hydrogeologische Methoden“, 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer, Berlin
- Lehr, C. & Sass, I. (2014), „Thermo-optical parameter acquisition and chracterization of geologic properties: a 400-m deep BHE in a karstic apline marble aquifer“, *Environmental Earth Sciences*, **72**, 1403-1419
- Lewang, A. (2013), „Labortechnische Vergleichsstudie von Systemdurchlässigkeiten in Anlehnung an DIN 18130-1 bei Ainwendung verschiedener Randbedingungen“, unveröffentl. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
- Lin, F. (2006), „Modeling of Hydration Kinetics and Shrinkage of Portland Cement Paste“, PhD-Thesis, Columbia University, New York, USA
- Lunardini, V.J. (1988): „Freezing of soil with an unfrozen water content and variable thermal properties“, CRREL Report 88-2, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Springfield
- Magri, F. (2009), „Derivation of the coefficients of thermal expansion and compressibility for use in FEFLOW“, FEFLOW White Paper Vol. 3, Berlin, 13-19
- Mands, E. (2012), „Chancen und Hemmnisse bei erdgekoppelten Wärmepumpen“, 5. Norddeutsche Geothermietagung Hannover, 17.-18.10.2012, Hannover

- Manns, J. (2013), „Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit und der Frost-Tau-Widerstandsfähigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden mit einem neuen Prüfverfahren“, unveröffentl. Masterarbeit, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Höxter
- McKenzie, J.M., Voss, C.I. & Siegel, D.I. (2007), „Groundwater flow with energy transport and water-ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs“, *Advances in Water Resources*, 30, 966-983
- Mehnert, E. (2004): „The Environmental Effects of Ground-Source Heat Pumps – A Preliminary Overview“, Open-File Series Report 2004-2, Illinois State Geological Survey, USA
- Miller, H. (1982), „Physical properties of ice“ In Angenheister, G. (Ed.), Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Vol. V(B), pp. 482-507, Springer, Berlin
- Moo-Young, H.K. and Zimmie, T.F. (1996), „Geotechnical Properties of Paper Mill Sludges for Use in Landfill Covers“, *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**, 768-775
- Mottaghy, D. & Rath, V. (2006), „Latent heat effects in subsurface heat transport modelling and their impact on palaeotemperature reconstructions“, *Geophysical Journal International*, **164**, 236-245
- Müller, L. (2004), „Geotechnische Untersuchungen zur Optimierung der geotechnischen Energiegewinnung mit Erdwärmesonden“, In: Mitt. Ingenieur- und Hydrogeologie, H. 89, , RWTH Aachen, 49-58
- Müller, L. (2007), „Geotechnische Anforderungen an die Qualität und Ausführung von Erdwärmesonden“ In: Otto. F. Veröff. 16. Tagung für Ingenieurgeologie, 359-366, Bochum
- Müller, L. (2009a), „Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden“, *bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, **07-08/2009**, 30-36
- Müller, L. (2009b), „Frost-Tau-Widerstand von Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden“, „Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V. (Hg.): Tagungsband Der Geothermiekongress 2009, 17.-19.11.2009, Bochum
- Nagare, R.M., Schincariol, R.A., Quinton, W.L. & Hayashi, M. (2012), „Effects of Freezing on Soil Temperature, Freezing Front Propagation and Moisture Redistribution in Peat: Laboratory Investigations“, *Hydrology and Earth System Science*, **16**, 501-515
- Niederbrucker, R. (2010), „Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren zur Optimierung der Entzugsleistung von Erdwärmefontänen“, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, **62**, Issue 5-6, 94-104
- Niederbrucker, R. & Steinbacher, N. (2008), „Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmefontänen“, Technischer Endbericht, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz, Österreich
- Ochsner, K. (2009), „Wärmepumpen in der Heizungstechnik“, 5. Überarbeitete Auflage, C.F.Müller Verlag, Heidelberg
- Ono, T. (2002), „Lateral deformation of freezing clay under triaxial stress condition using laser-measuring device“, *Cold Regions Science and Technology*, **35**, 45-54
- Othman, M.A & Benson, C.H. (1993), „Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Frozen and Thawed In Situ“, *Journal of Geotechnical Engineering*, **119**, 276-294
- Othman, M. & Benson, C. (1994), „Effect of Freeze-Thaw on the Hydraulic Conductivity and Morphology of Compacted Clay“, *Canadian Geotechnical Journal*, **30**, 236-246.
- Othman, M.A., Benson, C.H., Chamberlain, E.J. & Zimmie, T.F. (1994), „Laboratory Testing to Evaluate Changes in Hydraulic Conductivity of Compacted Clays Caused by Freeze-Thaw: State-of-the-Art“, In: Danie. D.E. & Trautwein, S.J. (Ed.): Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142, Philadelphia
- Papula, L. (2009), „Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler“, 10. Auflage, Vieweg+Teubner / GWV Fachverlag, Wiesbaden

- Paudel, B. & Wang, B. (2010), „Freeze-thaw effect on consolidation properties of fine grained soils from the Mackenzie valley, Canada“, GEO 2010 – 63<sup>rd</sup> Canadian Geotechnical Conference, Calgary, Alberta, 992-996
- PK Geothermie (2011), „Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern“, Bericht, Personenkreis Geothermie der Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Geologie, Wiesbaden
- Philippacopoulos, A.J. & Berndt, M.L. (2001), „Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps“, *Geothermics*, **30**, 527-545
- Poirier, D. & Salcudean, M. (1988), „On numerical methods used in mathematical modeling of phase change in liquid metals“, *Journal of Heat Transfer*, **110** (3), 562–570
- Prinz, H. & Strauß, R. (2011), „Ingenieurgeologie“, 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Rauh, F. & Thuro, K. (2007), „Rasche und optimierte Vorhersage von Quelleigenschaften bei Tonen mithilfe des Pulverquellversuchs“, Tagungsband: 16. Tagung für Ingenieurgeologie und Fom „Junge Ingenieurgeologen“, Bochum
- Rebstock, D. (2005), „Kleinbohrpfähle unter statischer und zyklischer Belastung – hypoplastische Simulationen“, Beiträge zum Pfahl-Symposium 2005 – Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 80, 349-365
- Reuß, M. (2014), „VDI 4640 Thermische Nutzung des Untergrundes – Überarbeitung der Richtlinie“, Tagungsband: OTTI – Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 01.07-02.07., Neumarkt
- Reuß, M. & Kuckelkorn, J.M. (2011), „Verfahren zur Bewertung der Abdichtfunktion von Erdwärmesonden mit Verfüllbaustoffen“, Tagungsband, OTTI - Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 27.09.-28.09., Regensburg
- Riegger, M. (2010), EWSplus (Untersuchung zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden) – Erste Ergebnisse“, Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V. (Hg.): Tagungsband Der Geothermiekongress 2010, 17.-19.11.2010, Karlsruhe
- Riegger, M. & Rolker, J. (2014), „EWS-tech: Projekt-Übersicht und erste Ergebnisse zur Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden“, Tagungsband: OTTI – Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 01.07-02.07., Neumarkt
- Rohner, E. & Rybach, L. (2001), „Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung“, Schlussbericht, Projekt 20'536, Bundesamt für Energiewirtschaft, Zürich, Schweiz
- Rumohr, S. (2009), „Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Hessen – Zahlen und Kenngrößen“, *bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, **03/2009**, 46-52
- Sanner, B., Reuß, M. & Mands, E. (1999), „Thermal Response Test - eine Methode zur in-situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden“ Geothermische Energie, 7-1/2, S. 24-25
- Sass, I. (2010), „Oberflächennahe Geothermie – Risiken und Lösungsansätze“, Grundwasser und Grundwasserleiter – Nutzungskonflikte und Lösungsansätze – 24. Trinkwasserkolloquium 2010, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 201, Kommissionsverlag Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München, 93-106
- Sass, I. & Lehr, C. (2011), „Improvements on the Thermal Response Test Evaluation Applying the Cylinder Source Theory“, Proceedings Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA
- Schäffel, P. (2009), „Zum Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe auf das autogene Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein“, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar
- Seibel, M. (2013), „Abgrenzung der ‘allgemein anerkannten Regeln der Technik’ vom ‘Stand der Technik’“, *Neue Juristische Wochenschrift*, **41**, 3000-3004

- Skouby, A. (Ed.) (2010), „Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems – Design and Installation Standards 2010 Edition“, International Ground Source Heat Pump Association, Oklahoma State University, Stillwater, OK, USA
- Slack, G.A. (1980), „Thermal conductivity of ice“, *Physical Review B*, **22**, 3065-3071
- Smolczyk, H.-U. (1996), „Internationale Vereinbarungen“, In: Smolczyk, H.-U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch Teil 1, 5. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- Stefan, J. (1891), „Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung der Polarmeere“, *Annalen der Physik*, **278** (2), 269-286
- Stober, I. & Bucher, K. (2012), „Geothermie“, Springer, Berlin
- Sugama, T. (2006), „Advanced Cements for Geothermal Wells“, BNL-77901-2007-IR, Report, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA
- Thomas, S. & Kempfert, H.-G. (2011), „Untersuchungen des Pfahltragverhaltens infolge zyklisch axialer Einwirkungen in einer Spannungszelle“, Beiträge zum Pfahl-Symposium 2011 – Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 94, 139-157
- Thuro, K. (1993), „Der Pulver-Quellversuch – ein neuer Quellhebungsversuch“, *Geotechnik*, **16**, 101-106
- Turcotte, D.L. & Schubert, G. (1982), „Geodynamics – Applications of continuum physics to geological problems“, John Wiley & Sons, New York, 168-178
- Triantafyllidis, T. (2007), „Arbeitsblätter für Grundbau“, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe
- Triantafyllidis, T. (2011), „Arbeitsblätter für Bodenmechanik“, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, KIT – Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- Unold, F. (2006), „Der Gefriersog bei der Durchfrostung und das Kompressionsverhalten des wieder aufgetauten Bodens“, Dissertation, Universität der Bundeswehr, München
- Urbaneck, T. (2012), „Kältespeicher – Grundlagen, Technik, Anwendung“, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München
- Van Genuchten, M. Th. (1980), „A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils“, *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 892-989
- Viklander, P. (1998), „Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw“, *Canadian Geotechnical Journal*, **35**, 471-477
- Von Soos, P. (1996), „Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor“, In: Smolczyk, H.-U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch Teil 1, 5. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- Wagner, W. & Kretschmar, H.-J. (2008), „International Steam Tables – Properties of Water and Steam based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97“, Springer, Berlin
- Wagner, W. & Pruß, A. (2002), „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use“, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **31**, 387-535
- Wenzel, B. (2012), „‘Frostfreie’ Auslegung von Erdwärmeanlagen – Auswirkungen auf Technik und Betrieb von Sole-Wärmepumpen“, 5. Norddeutsche Geothermietagung Hannover, 17.-18.10.2012, Hannover
- Wischers, G. & Dahms, J. (1970), „Das Verhalten des Betons bei sehr niedrigen Temperaturen“, Beton-Verlag, Düsseldorf
- Wöstefeld, L.-E. (2013), „Neues geothermisches Messverfahren – Vergleichsstudie zweier Messapparaturen zu Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130-1“, unveröffentl. Bachelorarbeit, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Höxter
- Qi, J., Yao, X. & Yu, F. (2013), „Consolidation of Thawing Permafrost Considering Phase Change“, *Journal of Civil Engineering*, **17**, 1293-1301

- Zeng, Q., Fen-Chong, T., Dangla, P. and Li, K. (2011), „A study of freezing behavior of cementitious materials by poromechanical approach“, *Int. J. Solids and Structures*, **48**, 3267-3273
- Zorn, R., Köhler, A., Huttenloch, P. Steger, H. & Stober, I. (2014), „Systemdichtheit und Sulfatbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden“, Tagungsband: OTTI – Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 01.07-02.07., Neumarkt



## NORMEN, REGELWERKE UND LEITFÄDEN

- ASTM D-5084 (2010), „Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter“, Annual book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- ASTM D-5887 (2009), „Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter“, Annual book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- ASTM D-6035 (2008), „Standard Test Methods for Determining the Effect of Freeze-Thaw on Hydraulic Conductivity of Compacted or intact Soil Specimens Using a Flexible Wall Permeameter“, Annual book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- ASTM E-177 (2013), „Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods“, Annual book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- ASTM E-691 (2013), „Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method“, Annual book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- BAW (2004), „Frostprüfung von Beton“, Merkblatt, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- BergG (2006), „Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S.1310), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2933).
- DIN 18123 (2011), „Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 18130-1 (1998), „Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 18135 (2012), „Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Eindimensionaler Kompressionsversuch“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 18136 (2003), „Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Einaxialer Druckversuch“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 52104-2 (1982), „Prüfung von Naturstein – Frost-Tau-Wechsel-Versuch – Verfahren Z“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN CEN/TS 14418 (2006), „Geosynthetische Dichtungsbahnen – Prüfverfahren zur Bestimmung des Einflusses von Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen auf die Durchlässigkeit von geosynthetischen Tondichtungsbahnen (Vornorm)“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 1367-1 (2007), „Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeiten von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN ISO/TS 17892-11 (2005), „Geotechnische Erkundungen und Untersuchungen – Laborversuche an Bodenproben – Teil 11: Bestimmung der Durchlässigkeit mit konstanter und fallender Druckhöhe (Vornorm)“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin
- DGG & DGGT (2014), „Empfehlungen des Arbeitskreises Geothermie – Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb, Qualitätssicherung“, Version der Offenlegung, Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaft e.V. (DGG) und Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) (Hrsg.), Ernst & Sohn, Berlin
- DGGT (1990), „Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen Häfen und Wasserstraßen EAU 1990“, 8. Auflage, Hafentechnische Gesellschaft e.V. und Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, e.V. (Hrsg.), Ernst & Sohn, Berlin

- DGGT (2005), „Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen Häfen und Wasserstraßen EAU 2004“, 10. Auflage, Hafentechnische Gesellschaft e.V. und Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Ernst & Sohn, Berlin
- DGGT (2012a), „Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen Häfen und Wasserstraßen EAU 2012“, 11. Auflage, Hafentechnische Gesellschaft e.V. und Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Ernst & Sohn, Berlin
- DGGT (2012b), „Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle“, 2. Auflage, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Ernst & Sohn, Berlin
- IKV (2013), „Einsatz von Kunststoffrohren in der Geothermie“, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen (Hrsg.), Aachen ([www.ikv-aachen.de](http://www.ikv-aachen.de), 2013)
- ÖNORM B 3303 (2002), „Betonprüfung“, (zurückgezogen 2010), Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- SIA 384-6 (2010), „Erdwärmesonden“, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz
- VBI (2010), „VBI-Leitfaden – Tiefe Geothermie“, 1. Auflage, Verband Beratender Ingenieure VBI, Berlin
- VBI (2012), „VBI-Leitfaden – Oberflächennahe Geothermie“, 3. Auflage, Verband Beratender Ingenieure VBI, Berlin
- VDI 4640-1 (2010), „VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte“, Beuth, Berlin
- VDI 4640-2 (2001), „VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“, Beuth, Berlin
- WHG (2009), „Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG)“, 31.07.2009, (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 4 Absatz 76 des Gesetzes vom 7.08.2013 (BGBl. I S. 3154)
- VDZ (2002), „Zement Taschenbuch 2002“, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Verlag Bau + Technik, Düsseldorf
- VwVwS (1999), „Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen“, 17.05.1999, BAnz. vom 29.05.1999 Nr. 98a

## LEITFÄDEN UND BEKANNTMACHUNGEN DER LÄNDER

### Baden-Württemberg

- UMBW (2012), „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)“, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg, Stand: 01.04.2012, <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/87438/?shop=true&shopView=46304>
- Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden“, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg, (2005) [http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/wissenswelt/gesetze/Leitfaden/BW Leitfaden - Nutzung von Erdwaerme.pdf](http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/wissenswelt/gesetze/Leitfaden/BW_Leitfaden_-_Nutzung_von_Erdwaerme.pdf)

### Bayern

- Oberflächennahe Geothermie (Informationsbroschüre), (2011) [http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug\\_app000006?SID=1914497887&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:193885,AARTxNODENR:195976,USERxARTIKEL:artlist1.htm\)=Z](http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug_app000006?SID=1914497887&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:193885,AARTxNODENR:195976,USERxARTIKEL:artlist1.htm)=Z)

### Berlin

- SSU (2012), „Erdwärmenutzung in Berlin – Leitfaden für Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren mit einer Heizleistung bis 30 kW außerhalb von Wasserschutzgebieten“, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt – VIII D 3, Berlin, Stand: Februar 2012,

<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/wasser/wasserrecht/pdf/leitfaden-erdwaerme.pdf>  
(31.03.2014)

## **Brandenburg**

Online: „Bürgerinformationssystem oberflächennahe Geothermie“, (2010), <http://www.geo-brandenburg.de/geothermie>, (Leitfaden „Wärme aus Brandenburger Erde“ nicht mehr verfügbar)

## **Bremen**

kein eigener Leitfaden, (2010), Checkliste mit technischen und rechtlichen Hinweisen online: <http://www.gdfb.de/>

## **Hamburg**

BSU (2014a), „Produktliste A der in Hamburg als geeignet erachteten Verpresssuspensionen für den Bau von Erdwärmesonden mit Frost-Tau-Beanspruchung“, Bekanntmachung der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Stand 26.07.2013, Zugriff 04.06.2014, <http://www.hamburg.de/contentblob/3512312/data/produktliste-a.pdf>

BSU (2014b), „Prüfverfahren für Verpressmittel“, <http://www.hamburg.de/contentblob/3736820/data/pruefverfahren.pdf>

BSU (2014c), „Eignung von Verpressmitteln“, <http://www.hamburg.de/grundwasser/3511796/eignung-von-verpressmitteln>

## **Hessen**

„Erdwärmennutzung in Hessen“, (2011), [http://www.hlug.de/medien/geologie/dokumente/erdwaerme/erdwaerme\\_web.pdf](http://www.hlug.de/medien/geologie/dokumente/erdwaerme/erdwaerme_web.pdf)

## **Mecklenburg-Vorpommern**

"Leitfaden Erdwärmesonden in Mecklenburg-Vorpommern", (Bezug 2013)

## **Niedersachsen**

Leitfaden: „Erdwärme in Niedersachsen - Genehmigungs-voraussetzungen, insbesondere für Erdwärmesonden mit einer Heizleistung bis 30 kW“, (2006), <http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/6460>

## **Nordrhein-Westfalen**

„Geothermie in Nordrhein-Westfalen: erkunden - bewerten – nutzen“, (2011), <http://www.gd.nrw.de/zip/gbroscht.pdf>

Informationsportal unter: <http://www.gd.nrw.de/>

## **Rheinland-Pfalz**

„Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden“, (2007), [http://www.lgb-rlp.de/erdwaerme\\_d.html](http://www.lgb-rlp.de/erdwaerme_d.html)

## **Saarland**

„Leitfaden Erdwärmennutzung“, (2008), [http://www.saarland.de/dokumente/ressort\\_umwelt/08-05\\_Leitf\\_Erdwaerme.pdf](http://www.saarland.de/dokumente/ressort_umwelt/08-05_Leitf_Erdwaerme.pdf)

## **Sachsen**

SLULG (2011), „Erdwärmesonden - Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Sachsen, Stand: 28.02.2011, <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/geologie/18992.htm#article35568>

## **Sachsen-Anhalt**

„Karte der hydrogeologischen Standortbeschreibung für die oberflächennahe Erdwärmennutzung“ (Maßstab 1:400), (2010), [http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek\\_Politik\\_und\\_Verwaltung/Bibliothek\\_LAGB/geothermie/abb/oben/OFEN\\_400\\_net.png](http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LAGB/geothermie/abb/oben/OFEN_400_net.png)

**Schleswig-Holstein**

„Geothermie in Schleswig-Holstein -Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes“, (2011), [http://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/upool/gesamt/geologie/geothermie\\_2011.pdf](http://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/upool/gesamt/geologie/geothermie_2011.pdf)

**Thüringen**

„Nutzung oberflächennaher Geothermie - Vorläufige Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung angezeigter Vorhaben“, (2010), [http://www.tlug-jena.de/geothermie/dokumente/arbeitshilfe\\_erdwaerme.pdf](http://www.tlug-jena.de/geothermie/dokumente/arbeitshilfe_erdwaerme.pdf)

## INTERNETQUELLEN

Geo-Slope (2013), „Verification of the Numerical Simulation of Freezing and Thawing in TEMP/W“  
GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada. Available from <http://downloads.geo-slope.com/geostudioresources/examples/8/x/2/TempW/Verification%20Freezing%20and%20Thawing.pdf> (29.11.2013)

Vuik, C. (2014), „Some historical notes on the Stefan problem“, Delft University of Technology,  
Download: <http://ta.twi.tudelft.nl/nw/users/vuik/wi1605/opgave1/stefan.pdf> (17.04.2014)

## SONSTIGE QUELLEN

Simplicol (2014), Telefonat mit der Fa. Simplicol über die Zusammensetzung derer Farbstoffe vom  
10.02.2014, 8:30 Uhr

BSU (2014d), Auskunft der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg, Korrespondenz  
vom 16.05.2014



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Erdwärmesonde (Doppel-U-Sonde, im Vertikalschnitt ein U-Sondenstrang verdeckt) nach DGG & DGGT [2014] .....	5
Abbildung 2: Bohrgerät und Bohrarbeiten einer Erdwärmebohrung (links) und Überlauf der Bohrspülung (rechts). (Abbildungen mit freundlicher Genehmigung der Frank Geoconsult GmbH, 2014) .....	7
Abbildung 3: Mögliche Schadensfälle aufgrund mangelhafter Hinterfüllung bei Erdwärmesonden. Darstellung von artesischen Grundwasserverhältnissen (A), einem hydraulischen Kurzschluss zweier Grundwasserstockwerke (B) und einem vertikalen Kontaminationspfad durch Schmutzeintrag von der GOK (C) [verändert nach DGG & DGGT 2014]. .....	10
Abbildung 4: Temperaturaufzeichnung der Vor- und Rücklauftemperaturen einer Erdwärmesonde (80m Tiefe, Doppel-U, Außendurchmesser 32 mm); Messzeitpunkt täglich um 12:00 Uhr).....	14
Abbildung 5: Temperaturaufzeichnung einer EWS-Anlage. Datum: 25.01.2014. Messintervall: 5 min. Detailausschnitt siehe Abbildung 6. (Datenbereitstellung und Genehmigung durch Gerhard Beyer) .....	15
Abbildung 6: Detailausschnitt der Temperaturaufzeichnung (Abbildung 5). .....	16
Abbildung 7: Temperaturprofile von Erdwärmesonden mit unterschiedlichen Sondenanordnungen. Schematische Darstellung (a und b) und FEFLOW Simulation nach 24 h (A und B). .....	18
Abbildung 8: Frost-Tau-Wechsel-Einfluss: Eingefrorene Verteilerleitung (A, Bassetti et al. 2006), vereister Verteilerschacht einer Erdwärmesondenanlage (B, Dittrich 2013) und Setzungsschäden einer Einfahrt über EWS (C mit Estrichauffüllung und D mit Kiesauffüllung, mit freundlicher Genehmigung des Geotechnischen Umweltbüros Lehr). .....	21
Abbildung 9: Übersicht der zugelassenen minimalen Betriebstemperaturen von EWS in Deutschland [Dittrich et al. 2014].....	23
Abbildung 10: Rissmuster nach vertikaler Durchfrostung eines Schluff-Kaolin-Gemisches nach Konrad & Lemieux [2005]. Die Durchfrostung erfolgte von oben (links). Geöffneter Prüfkörper von innen nach außen durchfrostet, nach Trocknung. Die Durchfrostung erfolgte von links nach rechts (rechts).....	29

Abbildung 11: Schematische Darstellung der rhythmischen Eislinsenbildung bei vertikaler Frosteindringung in einem feinkörnigen Boden [verändert nach Konrad & Morgenstern 1980, Unold 2006] .....	30
Abbildung 12: Entwicklung der Radialspannungen im Boden über die Tiefe. Angenommene Erddruckbeiwerte zwischen 0,5 und 3,0. ....	34
Abbildung 13: Schematischer Vertikalschnitt durch eine Wasserdurchlässigkeitsmesszelle. Über eine Membrane kann ein radialer Seitendruck aufgebracht werden.....	43
Abbildung 14: Schematische Darstellung des prälinearen, linearen und postlinearen Darcybereiches .....	44
Abbildung 15: Druckfestigkeiten von vier ausgewählten Hinterfüllmaterialien in Abhängigkeit der Abbindezeit und Abbindetemperatur.....	49
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Dimensionen des Wärmeflusses an einem Probevolumen.....	53
Abbildung 17: Gegenüberstellung der Durchfrostungsrichtung von außen nach innen (links) und von innen nach außen (rechts). Schematische Darstellungen (oben) und Prüfkörper des gleichen Materials nach einer Frost-Tau-Belastung (unten). ....	54
Abbildung 18: Schematischer vertikaler Schnitt durch die entwickelte Messzelle (links) und Prüfkörper bestehend aus einem mittigen Sondenrohr und einem ringzylindrischen Hinterfüllkörper (rechts) nach Anbergen et. al [2014a]. ....	57
Abbildung 19: Geschlossenen Messzelle (Links: Schematische Zeichnung. Rechts: Fotografie)....	58
Abbildung 20: Schematischer horizontaler Schnitt durch eine Erdwärmesonde mit einer Doppel-U-Sonde (links) und einem Prüfkörper für die Frost-Tau-Wechseluntersuchungen (rechts). ....	59
Abbildung 21: Gießanlagen für die Prüfkörperherstellung (links) mit seitlich zu öffnenden Gießhülsen (rechts) [Anbergen et al., 2014a] .....	62
Abbildung 22: Temperaturmessung (Messintervall 90 s) im Klimaschrank für die Prüfkörperlagerung. Die gestrichelten Linien (8 °C und 12 °C) markieren die Toleranzgrenzen für die Temperaturschwankungen. ....	63
Abbildung 23: Darstellung der Maximal- und Minimaltemperaturen (24 h Intervall) im Klimaschrank für die Prüfkörperlagerung. Der grau hinterlegte Bereich definiert den Temperaturschwankungsbereich, die gestrichelten Linien (8 °C und 12 °C) markieren die Toleranzgrenzen für die Temperaturschwankungen.....	63
Abbildung 24: Flussdiagramm des Prüfkonzeptes.....	66
Abbildung 25: Kalibrierungsmaterial A (links) und Kalibrierungsmaterial B (rechts) im lufttrockenen Zustand auf Millimeterpapier.....	70



Abbildung 26: Korngrößenverteilung des Kalibrierungsmaterials B. Ergebnisse von fünf Schlämmanalysen gemäß DIN 18123 [2011]. Die gestrichelte Linie markiert die Herstellerangabe. ....	71
Abbildung 27: Abschätzung der zu erwartenden Durchlässigkeiten der auf ihre Eignung geprüften Kalibrierungsmaterialien nach Hazen. ....	72
Abbildung 28: Schematischer Aufbau des Anlagentyps I für die Durchführung von Frost-Tau-Wechselversuchen nach Anbergen et al. [2014a] .....	73
Abbildung 29: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial A am Anlagentyp I. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz. ....	74
Abbildung 30: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial B am Anlagentyp I. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz. ....	74
Abbildung 31: Schematischer Aufbau des Anlagentyps II für die Durchführung von Frost-Tau-Wechselversuchen .....	75
Abbildung 32: Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit dem Kalibrierungsmaterial A in Abhängigkeit vom hydraulischen Druckgefälle am Anlagentyp II. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert. ....	76
Abbildung 33: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial A am Anlagentyp II. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz. ....	76
Abbildung 34: Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit dem Kalibrierungsmaterial B in Abhängigkeit vom hydraulischen Druckgefälle am Anlagentyp II. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert. ....	77
Abbildung 35: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial B am Anlagentyp II. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz. ....	78
Abbildung 36: Schematischer Aufbau des Anlagentyps III für die Durchführung von Frost-Tau-Wechselversuchen .....	79
Abbildung 37: Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit dem Kalibrierungsmaterial A in Abhängigkeit vom hydraulischen Druckgefälle am Anlagentyp III. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert. ....	79
Abbildung 38: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial A am Anlagentyp III. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz. ....	80

Abbildung 39: Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit Quarzmehl in Abhängigkeit vom hydraulischen Druckgefälle am Anlagentyp III. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert. ....	81
Abbildung 40: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Untersuchungen am Kalibrierungsmaterial B am Anlagentyp III. Die gestrichelte Linie markiert einen normalverteilten Datensatz. ....	81
Abbildung 41: Vergleich der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte der verwendeten Kalibrierungsmaterialien A (links) und B (rechts) an den unterschiedlichen Anlagentypen I bis III, sowie Gesamtdarstellungen der Versuche.....	82
Abbildung 42: Einfluss der Zeitschritt- und Messvolumengröße auf den relativen Fehler der Durchlässigkeitsbeiwertermittlung am Anlagentyp I. Exemplarische Darstellung definierte Konfigurationen über den relevanten Durchlässigkeitsbereich der Kalibrierungsversuche. ....	84
Abbildung 43: Einfluss der Anzahl der durchgeführten FTW-Simulationen auf die Durchlässigkeit. Durchlässigkeitsbeiwerte dreier Prüfserien mit je drei Prüfkörpern (gleiche Symbole). Die gepunkteten Linien markieren die Versuchsspur eines jeden Prüfkörpers. Die grauen Balken markieren den Streubereich des $k_f$ -Wertes nach vier FTW. ....	86
Abbildung 44: Auswertung dreier Versuche mit hoher Anzahl an FTW. Gesamtdarstellung mit gestrichelten Linien als Versuchsspur (oben), Darstellung der Ergebnisse (6 bis 53 FTW) in linearer Darstellung (unten).....	87
Abbildung 45: Klassierte Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit mehr als 5 Frost-Tau-Belastungen.....	89
Abbildung 46: Verteilung der Variationskoeffizienten der jeweiligen Dreifachbestimmung (Prüfkörper A,B,C) über den gesamten Langzeitversuch mit 53 FTW.....	90
Abbildung 47: p-p-Plot der Verteilung der Variationskoeffizienten des Langzeitversuches. Die gestrichelte Linie markiert dabei den Idealfall einer vollen Übereinstimmung. ....	91
Abbildung 48: Ergebnis der Versuche mit Calcium-Bentonit (3 Prüfkörper). Die Werte vor dem ersten Frost-Tau-Wechsel sind als Richtwerte zu verstehen, nach dem vierten FTW erfolgte keine Durchlässigkeitsmessung. Die gestrichelten Linien markieren die Versuchsspuren. ....	93
Abbildung 49: Quellhebungsversuch an einem reinen Calcium-Bentonit. Dreifachversuch mit einer Anfangshöhe von 20 mm und einer konstanten Auflast von $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ . Die gestrichelten Linien markieren die Versuchsspur.....	94
Abbildung 50: Prüfkörper nach einem FTW in der entwickelten Messzelle und anschließender Trocknung. Das Hinterfüllmaterial (Bezeichnung EG) enthält weder thermisch	

verbessernde Zusätze noch quellfähige Tonanteile. Die achsenparallelen Rissstrukturen sind präferierte Fließwege [Anbergen et al., 2011a].	96
Abbildung 51: Aufgesägter Prüfkörper nach 53 FTW-Belastungen und anschließendem Tracerversuch. Die eingefärbten Strukturen der Bruchfläche (Bildmitte) markieren die präferierten Fließwege des Wassers. Die Schnittfläche (linker, respektive rechter Rand) wurde durch den Sägeprozess so gestört, dass hier keine Einfärbungen zu erkennen sind.	97
Abbildung 52: Nahaufnahme eines aufgespaltenen Prüfkörpers 53 FTW-Belastungen und anschließendem Tracerversuch.	99
Abbildung 53: Normierte Hysterese bei Systemdurchlässigkeitsmessungen nach FTW-Simulationen. Darstellung von 15 Messungen an 3 Prüfkörpern eines Hinterfüllbaustoffes (Bezeichnung EE) mit quellfähigen Tonanteilen. Die Punkte stellen die gemessenen normierten Durchlässigkeiten dar, die durchgezogene Linie und der grau hinterlegte Bereich die 10 Prozent Markierung, die gestrichelte Linie markiert die mittlere normierte Hysterese nach 6 Stunden Versuchsdauer. ...	101
Abbildung 54: Normierte Hysterese der Systemdurchlässigkeitsmessungen von zwei Hinterfüllmaterialien (Bezeichnung EG und (5 Prüfkörper) nach einem FTW. Die Hinterfüllmaterialien enthalten keine quellfähigen Tonanteile. Die gestrichelten Linien markieren den rechnerischen normierten Hysteresebereich zwischen 1 und 0.	102
Abbildung 55: Thermografie-Versuche an Prüfkörpern nach definierten Befrostungszeiten. (A) aufgespaltenen Prüfkörper, (B) Temperaturprofil nach 1 h Kühlung, (C) Temperaturprofil nach 4 h Kühlung, (D) Temperaturprofil nach 17 h Kühlung [nach Anbergen et al., 2014b]	105
Abbildung 56: Wärmeleitfähigkeit von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur [verändert nach Anbergen et al. 2014b]	113
Abbildung 57: Modifizierte Wärmeleitfähigkeit der flüssigen und festen Phase von Wasser [Anbergen et al., 2014b]	114
Abbildung 58: Lineare Interpolation der Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur [Anbergen et al., 2014b]	116
Abbildung 59: Funktion der relativen Sättigung $S_{\text{water}}$ an ungefrorenem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Gefrierintervall von 1 K im linearen Fall und $w = 0.5$ im exponentiellen Fall, $S_{\text{water, res}} = 0$ [Anbergen et al. 2014b].	120
Abbildung 60: Funktion der Änderungsrate der relativen Sättigung $S_{\text{water}}$ an ungefrorenem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Gefrierintervall von von 1 K im linearen Fall und $w = 0.5$ im exponentiellen Fall, $S_{\text{water, res}} = 0$ [Anbergen et al. 2014b]	120

Abbildung 61: Scheinbare Wärmekapazität $C_{app}$ in Abhängigkeit der Temperatur bei linearen Ansatz und einem Gefrierintervall von 1 K und $S_{water,res} = 0$ [nach Anbergen et al. 2014b]	121
Abbildung 62: Dichte des Wassers in Abhängigkeit der Temperatur nach Wagner & Pruß [2002].	121
Abbildung 63: Annahme eines konstanten Volumens.....	122
Abbildung 64: Schematische Darstellung des Halbraummodells zur Kalibrierung des FEFLOW Plug-Ins [verändert nach McKenzie et al., 2007, aus Anbergen et al., 2014b].	124
Abbildung 65: Vergleich der FEFLOW Lösung mit der analytischen Neumann Lösung und einer numerischen Lösung mit SHEMAT [Mottaghy & Rath 2006]. Modellparameter: Exponentielle Übergangsfunktion mit $w = 1,0$ , Porosität $\varepsilon = 0,95$ , $T_{water} = 0^{\circ}\text{C}$ , $T_{ice} = -2^{\circ}\text{C}$ , $T_0 = -3^{\circ}\text{C}$ . [verändert nach Anbergen et al. 2014b]	126
Abbildung 66: Vergleich der FEFLOW Lösung mit der analytischen Neumann Lösung und einer numerischen Lösung mit SHEMAT [Mottaghy & Rath 2006]. Modellparameter: Exponentielle Übergangsfunktion mit $w = 1,0$ , Porosität $\varepsilon = 0,05$ , $T_{water} = 0^{\circ}\text{C}$ , $T_{ice} = -2^{\circ}\text{C}$ , $T_0 = -3^{\circ}\text{C}$ . [verändert nach Anbergen et al. 2014b]	127
Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der Ortskoordinate der Temperatur $T_{water}$ nach Lunardini [McKenzie et al., 2007] und als Ergebnis der numerischen Simulation mit FEFLOW	131
Abbildung 68: Temperaturprofil nach einer Simulationszeit von 24 Stunden. Die gepunkteten Linien definieren die Grenztemperaturen $T_{ice}$ und $T_{water}$ der Lunardini Lösung nach McKenzie et al [2007], die gestrichelte Linie definiert die berechneten Temperaturen [verändert nach Anbergen et al., 2014b]	131
Abbildung 69: Exemplarische Darstellung der örtlichen Verteilung der Temperatur (A), der modifizierten Wärmeleitfähigkeit des Wassers (B), der modifizierten volumetrischen Wärmekapazität des Wassers (C) und der modifizierten Durchlässigkeit der Matrix (D) der FEFLOW Simulation. 24 Stunden Simulationszeit, exponentielle Übergangsfunktion mit $w = 0,5$ und $\varepsilon = 0,05$ [Anbergen et al., 2014b].	132
Abbildung 70: Temperaturverteilung im Kalibrierungsmodell nach 24 Stunden in Abhängigkeit der implementierten Phasenwechselmodelle (Gefrierintervall 1 K linear, $w = 0,5$ exponentieller Ansatz). Porosität $\varepsilon = 0,05$ . Der Einfluss der Latentwärme bewirkt ein langsames Voranschreiten der Frostfront, als ohne Latentwärmeeinflüsse [Anbergen et al. 2014b].	134
Abbildung 71: Gegenüberstellung des Einflusses der Porosität auf die Temperaturverteilung im Kalibrierungsmodell mit Latentwärmeeinfluss nach 24 Stunden. Linearer Phasenübergang mit einem Gefrierintervall von 1 K [nach Anbergen et al. 2014b]	135

Abbildung 72: Gegenüberstellung des Frost- und des Tauzyklus unter Latentwärmeeinfluss nach 24 Stunden. Porosität $\varepsilon = 0,05$ , $T_i = -1\text{ °C}$ , $T_{\text{water}} = 0\text{ °C}$ . Linearer Ansatz. [nach Anbergen et al., 2014b].	136
Abbildung 73: Schematische Darstellung des Modellaufbaus für die thermische Berechnung eines Frost-Tau-Wechsels in der entwickelten Messzelle [Anbergen et al., 2014b]	137
Abbildung 74: Temperatur am äußeren Rand des Prüfkörpers in Abhängigkeit der Versuchszeit. Messung in drei Messzellen, Simulation mit FEFLOW mit und ohne Inkorporation des Phasenwechsels [Anbergen et al., 2014b]	139
Abbildung 75: Systemdurchlässigkeitsbeiwerte der Prüfserien ohne FTW Belastung (dunkelrot) und mit mindestens 6 FTW-Belastungen (blau). Darstellung des Streuungsbereiches.	144
Abbildung 76: Anstieg der Systemdurchlässigkeitsbeiwerte der Prüfserien aufgrund zyklischer Frost-Tau-Belastungen. Relativer Anstieg (grau) und absoluter Anstieg (schwarz).	145
Abbildung 77: Gegenüberstellung des durch FTW induzierten Anstieges der Systemdurchlässigkeiten gleicher Materialien. Jede Farbe markiert Prüfserien des gleichen Materials. Das Probenalter innerhalb einer Prüfserie steigt von links nach rechts an.	146
Abbildung 78: Systemdurchlässigkeitsbeiwerte der Prüfserien ohne FTW-Belastung (dunkelrot) und der korrespondierenden Materialdurchlässigkeiten (schwarz). Darstellung des Streuungsbereiches.	147
Abbildung 79: Anstieg der Durchlässigkeitsbeiwerte der Prüfserien im System gegenüber der reinen Materialdurchlässigkeit. Relativer Anstieg (grau) und absoluter Anstieg (schwarz).	148
Abbildung 80: Profilierungen des Sondenrohres zur Bestimmung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit auf die hydraulische Systemdurchlässigkeit. Besandung (A), geriffeltes Rohr (B) und Dichtringe (C).	149
Abbildung 81: Gegenüberstellung der Material- und Systemdurchlässigkeit eines Hinterfüllbaustoffes mit unterschiedlich profilierten Sondenrohren.	150
Abbildung 82: Haftreibungsuntersuchungen von Sugama [2006]. Prüfkörper aus Zementsuspension und Metallrohr (links) und Prüfaufbau für die Haftreibungsuntersuchungen (rechts).	151
Abbildung 83: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Haftreibungsuntersuchungen an Prüfkörpern aus HDPE-Rohren und unterschiedlichen Hinterfüllbaustoffen.	152
Abbildung 84: Korrelation der Ergebnisse der Haftreibungsuntersuchungen mit den gemessenen mittleren Systemdurchlässigkeiten der gleichen Materialien. Halblogarithmische Darstellung (oben) und lineare Darstellung (unten). Die gestrichelte Linie markiert die exponentielle Regressionskurve.	153

Abbildung 85: Klassierte Variationskoeffizienten der Versuche an Hinterfüllmaterialien.....	155
Abbildung 86: Vergleich des Anstieges der Systemdurchlässigkeiten aufgrund von FTW- Belastungen mit Untersuchungen des ZAE Bayern.....	157
Abbildung 87: Gegenüberstellung von Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen mit Hinterfüllmaterialien für EWS und Brunnen. ....	160

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1:	Darstellung von Schadensszenarien, die zu einer mangelhaften Hinterfüllung führen können, verändert nach Anbergen et al. [2013b] .....	11
Tabelle 2:	Materialkennwerte für die Simulation der Temperatursausbreitung in einer EWS. ....	18
Tabelle 3:	Übersicht über die Standpunkte der Bundesländer zur Frost-Tau-Wechsel Thematik.....	22
Tabelle 4:	Durchlässigkeitsbereiche von Böden in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ verändert nach DIN 18130-1 [1998], von Soos [1996] und Triantafyllidis [2011]. ....	37
Tabelle 5:	Empfohlene hydraulische Gradienten in Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes [ASTM D-5084 2010] .....	45
Tabelle 6:	Suspensionseigenschaften der vier Hinterfüllmaterialien für die Vorversuche .....	47
Tabelle 7:	Abmessungen für die Maßstabsberechnung typischer Erdwärmesonden zu den Prüfkörpermaßen.....	60
Tabelle 8:	Analysenergebnisse der örtlichen Wasserversorger der verwendeten Anmachwässer für die Probenherstellung.....	61
Tabelle 9:	Abschätzung des zu erwartenden Durchlässigkeitsbereiches der auf ihre Eignung geprüften Kalibrierungsmaterialien.....	72
Tabelle 10:	Gegenüberstellung der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte der Kalibrierungsversuche an den drei Anlagentypen und insgesamt.....	83
Tabelle 11:	Unsicherheiten der Messgrößen je Anlagentyp und relative Fehler der maßgeblichen Durchlässigkeitsbereiche. ....	85
Tabelle 12:	Modellparameter für die Berechnung der Temperaturverteilung während des Durchfrostungsprozesses [Anbergen et al. 2014b].....	125
Tabelle 13:	Parameter für die Modellierung des Modells nach McKenzie et al. [2007] zum Abgleich mit der Lösung nach Lunardini und den Parameterstudien. ....	130
Tabelle 14:	Materialeigenschaften für die thermische Berechnung eines Frost-Tau-Wechsels in der entwickelten Messzelle [Anbergen et al., 2014b].....	138
Tabelle 15:	Simulationsparameter für die thermische Berechnung eines Frost-Tau-Wechsels in der entwickelten Messzelle [Anbergen et al., 2014b].....	138

Tabelle 16:	Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Temperaturwerte an der Außenseite der Prüfkörper nach 1, 4 und 17 h [verändert nach Anbergen et al., 2014b] .....	140
Tabelle 17:	Probenbezeichnung und Produktinformationen der geprüften Hinterfüllbaustoffe.....	142



## **ERKLÄRUNG**

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Schriften entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Hamburg, den 31.08.2014

---

---

## LEBENS LAUF

### Curriculum Vitae

#### ARBEITSERFAHRUNG

Anbergen, Hauke

seit 01.2014  
Frank GeoConsult GmbH, Hamburg  
Projektingenieur und wissenschaftlicher Mitarbeiter

03.2011 – 12.2013  
Knabe Enders Dührkop Ingenieure GmbH, Hamburg  
Projektingenieur und wissenschaftlicher Mitarbeiter

04.2010 – 09.2010  
E.ON Kernkraft GmbH – Kernkraftwerk Stade, Stade  
Praktikum und Diplomarbeit

#### AUSBILDUNG

04.2009 – 09.2010  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe  
Fachstudium des Bauingenieurwesens (Diplom)  
Diplomnote: 1,3 (Auszeichnung Ludwig-Lenz-Preis)

09.2008 – 03.2009  
Università degli Studi di Trento, Trient, Italien  
Bachelor Umweltingenieurwesen  
Abschlussnote: Summa cum Laude

10.2007 – 08.2008  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe  
Grundfachstudium Bauingenieurwesen und Umwelttechnik

10.2005 – 09.2007  
Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg  
Vordiplom Bauingenieurwesen und Umwelttechnik

1996 – 2005  
Sankt Ansgar Gymnasium, Hamburg  
Abiturnote: 1,2

#### MITGLIEDSCHAFTEN

VDI, ASTM

---

# Anhang